



Titre: Sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil avec
réculte d'énergie

Auteur: Amina Hentati

Date: 2016

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Hentati, A. (2016). Sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil
avec récolte d'énergie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2169/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2169/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-François Frigon, & Wessam Ajib
Advisors:

Programme: génie électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SÉLECTION DES NŒUDS DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL AVEC
RÉCOLTE D'ÉNERGIE

AMINA HENTATI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE EN SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
JUIN 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

SÉLECTION DES NŒUDS DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL AVEC
RÉCOLTE D'ÉNERGIE

présenté par : HENTATI Amina

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise en sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CARDINAL Christian, Ph. D., président

M. FRIGON Jean-François, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. AJIB Wessam, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme SANSÒ Brunilde, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes chers parents : ma mère Salwa Belhaj et mon père Lotfi Hentati pour leur soutien psychologique continuel.

Je remercie beaucoup mon frère Faiez ainsi que ma petite sœur Farah pour leur encouragement et leur soutien moral. Je tiens à remercier tout membre de ma famille qui de près ou de loin a contribué à ma réussite.

Je remercie énormément mon directeur de recherche Jean-François Frigon ainsi que mon co-directeur Wessam Ajib pour leur excellent encadrement, leurs encouragements et leurs conseils constructifs. Un grand merci va également au post-doctorant Elmahdi Driouch pour ses conseils et son appui si profond tout au long de ma maîtrise.

Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté pour évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.

Je remercie mes collègues : Zoubeir, Zakaria, Rami, Animesh, Charles et Eddy pour leur aide et échanges de points de vue durant toute la période de ma maîtrise.

Finalement, je remercie toute l'équipe de recherche du laboratoire TRIME et du centre de recherche PolyGrames.

RÉSUMÉ

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie est une technologie de communication sans fil émergente avec une large variété d'applications telles que la surveillance de l'environnement. Maximiser le nombre d'échantillons prélevés par le collecteur de données à partir des capteurs est une approche clé afin de minimiser les incertitudes de mesure pour ces applications. Le système considéré dans le présent mémoire considère le problème de sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie afin de maximiser le nombre de capteurs sélectionnés dans un scénario de liaison montante sujet aux contraintes de satisfaction d'un seuil de rapport signal sur bruit requis à la réception. Ce réseau se compose d'un ensemble de capteurs récolteurs d'énergie et un collecteur de données non-récolteur d'énergie, équipé de plusieurs antennes et responsable de la réception des données transmises par les capteurs. En utilisant un récepteur par forçage à zéro (ZF), le collecteur de données sélectionne le plus grand nombre de nœuds possible pouvant transmettre afin de maximiser la quantité reçue de l'information, tout en satisfaisant leurs contraintes de qualité de service (QoS) en terme de rapport signal-sur-bruit. Le problème est formulé comme un programme non linéaire en nombres entiers. On a également prouvé la **NP**-difficulté du problème. Bien que le nombre optimal de capteurs sélectionnés peut être obtenu par la recherche exhaustive, il est difficile de mettre en œuvre cette approche dans la pratique en raison de sa complexité prohibitive. Ainsi, deux algorithmes heuristiques et efficaces en termes de complexité et performance sont proposés pour résoudre ce problème. Les résultats des simulations montrent les bonnes performances des algorithmes proposés et illustrent leur capacité d'adaptation et d'efficacité dans le contexte de la récolte d'énergie. Une étude d'équité est également réalisée afin d'évaluer l'équité des algorithmes développés et d'améliorer leurs performances sur ce niveau. Les résultats numériques montrent l'efficacité des améliorations d'équité proposées.

Mots clés : récolte d'énergie, sélection des nœuds, réseaux de capteurs sans fil, récepteur « zero-forcing », **NP**-difficulté, équité.

ABSTRACT

The use of energy harvesting wireless sensor networks is an emerging wireless communication technology with a wide range of applications such as environment monitoring. Maximizing the number of samples collected by the sink from sensors is a key approach in order to minimize uncertainties for those applications. The considered system in this work consists of an uplink scenario with energy harvesting sensors communicating with a non-energy harvesting sink, equipped with multiple antennas, receiving data forwarded by the sensors. Using a zero-forcing (ZF) receiver, the data collector (i.e., sink) selects the largest possible set of transmitting sensor nodes to maximize the received quantity of information, while satisfying their signal-to-noise ratio quality of service (QoS) constraints. This work presents efficient and simple energy harvesting node selection algorithms in energy harvesting wireless sensor networks in order to maximize the number of selected sensors. The problem formulated as an integer non-linear program, is proved to be **NP**-hard. Although the optimal number of sensors can be found by exhaustive search, it is difficult to implement this approach in practice due to its prohibitive complexity. Thus, two low complexity and efficient heuristic algorithms are proposed to perform node selection decisions. Simulation results show the performance of the proposed algorithms and illustrate their adaptability and efficiency in the energy harvesting context. A fairness study is also performed in order to evaluate the fairness of the developed algorithms and improve their performances in this context. The numerical results show the efficiency of the proposed fairness improvements.

Index Terms: energy harvesting (EH), node selection, wireless sensor networks, zero-forcing (ZF) receiver, **NP**-hardness, fairness.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES MATHÉMATIQUES	xi
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE ET MOTIVATIONS	1
1.1 Introduction	1
1.2 Contexte général	1
1.3 Problématique	2
1.4 Objectifs de recherche	3
1.5 Contributions	4
1.6 Plan du mémoire	4
1.7 Conclusion	5
CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS ET REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Introduction	6
2.2 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)	6
2.2.1 Définition	6
2.2.2 Caractéristiques	7
2.2.3 Limites des sources d'énergie existantes	8
2.2.4 Applications des réseaux de capteurs sans fil	9
2.2.5 Défis envisagés	11
2.3 La récolte d'énergie	12
2.3.1 Définition de la récolte d'énergie	12
2.3.2 Sources d'énergie	12
2.3.3 Techniques de la récolte d'énergie	13

2.3.4	Avantages	15
2.4	Les systèmes à antennes multiples	16
2.4.1	Configurations existantes	17
2.4.2	Récepteurs utilisés	18
2.4.3	Gains réalisés avec l'utilisation des systèmes à antennes multiples . .	20
2.5	Revue de littérature	21
2.5.1	L'ordonnancement	22
2.5.2	L'équité dans les réseaux	24
2.6	Conclusion	26
CHAPITRE 3 MODÈLE DE SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME .		27
3.1	Introduction	27
3.2	Modèle du système	27
3.3	Formulation du problème	30
3.4	NP -Difficulté	31
3.5	Borne supérieure	34
3.6	Conclusion	35
CHAPITRE 4 ALGORITHMES PROPOSÉS		36
4.1	Introduction	36
4.2	L'algorithme optimal par recherche exhaustive	36
4.11	L'algorithme par sélection aléatoire	37
4.12	Algorithmes heuristiques proposés	38
4.12.1	L'algorithme SO-NSA	39
4.12.2	L'algorithme LCE-NSA	40
4.12.3	L'algorithme adaptatif	41
4.13	Analyse de complexité	41
4.14	Conclusion	43
CHAPITRE 5 RÉSULTATS et DISCUSSIONS		44
5.1	Introduction	44
5.2	Paramètres des simulations	44
5.3	Résultats des simulations	44
5.4	Conclusion	47
CHAPITRE 6 AMÉLIORATIONS DE L'ÉQUITÉ ET RÉSULTATS		48
6.1	Introduction	48

6.2	Mesure d'équité utilisée	48
6.3	Analyse d'équité	49
6.4	Modifications apportées	50
6.4.1	Métrique en exponentielle	51
6.4.2	Métrique en moyenne statistique	51
6.5	Résultats numériques	52
6.5.1	Choix des paramètres	53
6.5.2	Résultats des simulations	53
6.6	Conclusion	59
CHAPITRE 7 CONCLUSION		60
7.1	Synthèse des travaux	60
7.2	Limitations de la solution proposée	61
7.3	Améliorations futures	61
RÉFÉRENCES		63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Comparaison de la densité d'énergie pour différentes batteries électro-chimiques (Roundy et al., 2004)	8
Tableau 3.1	Notations	30

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Applications des réseaux de capteurs (NICS labs, 2014)	9
Figure 2.2	Applications des réseaux de capteurs (Putra, 2014)	10
Figure 2.3	Récolteur d'énergie d'oreille (Pele, 2012)	15
Figure 2.4	Récolteur d'énergie du cœur (Pele, 2012)	15
Figure 2.5	Récolteur d'énergie à partir des mouvements de transpiration (Pele, 2012)	15
Figure 2.6	La configuration MIMO et ses dérivées (Whitacre et al., 2008)	17
Figure 2.7	La configuration de MIMO multiutilisateurs (Whitacre et al., 2008) .	17
Figure 2.8	Exemple où l'équité entre les nœuds est importante	25
Figure 3.1	Modèle du système	28
Figure 3.2	Modèle de la récolte d'énergie	29
Figure 5.1	Comparaison des algorithmes pour différentes valeurs de λ ($\eta = 0dB$). .	45
Figure 5.2	Comparaison des algorithmes pour différents η	46
Figure 5.3	Comparaison des algorithmes pour différents K ($\eta = 0dB$).	47
Figure 6.1	Analyse d'équité pour SO-NSA.	49
Figure 6.2	Analyse d'équité pour LCE-NSA.	50
Figure 6.3	Comparaison de l'indicateur de Jain pour SO-NSA et FSO-NSA1. . .	53
Figure 6.4	Comparaison de l'indicateur de Jain pour LCE-NSA et FLCE-NSA1. .	54
Figure 6.5	Comparaison de l'indicateur de Jain pour SO-NSA et FSO-NSA2. . .	55
Figure 6.6	Comparaison de l'indicateur de Jain pour LCE-NSA et FLCE-NSA2. .	56
Figure 6.7	Comparaison des performances de SO-NSA et FSO-NSA1.	56
Figure 6.8	Comparaison des performances de LCE-NSA et FLCE-NSA1.	57
Figure 6.9	Comparaison des performances de SO-NSA et FSO-NSA2.	58
Figure 6.10	Comparaison des performances de LCE-NSA et FLCE-NSA2.	59

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES MATHÉMATIQUES

\forall	pour tout
\approx	environ
\in	appartient à
\wedge	conjonction logique
\vee	disjonction logique
$\max\{\cdot\}$	maximum de
$ \cdot $	cardinal d'un ensemble
$\binom{\cdot}{\cdot}$	coefficient binomial
\mathbb{R}	l'ensemble des nombres réels
$O(\cdot)$	comparaison asymptotique grand O
$(\cdot)^*$	transposé conjugué d'un vecteur ou d'une matrice
$\mathbf{E}[\cdot]$	espérance d'une variable aléatoire ou un vecteur de variables aléatoires
IT	Intervalle de Temps
J	Joule
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
ML	Maximum Likelihood
MMSE	Maximum Mean Square Error
MU-MIMO	Multi-User MIMO
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SINR	Signal to Interférence and Noise Ratio
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
TIC	Technologie de l'information et de la communication
ZF	Zero-Forcing

CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE ET MOTIVATIONS

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les progrès des technologies de l'information et de communication (TIC) ont profondément affecté l'interaction de la société avec la technologie. Cette évolution des technologies informatiques a entraîné la réduction des coûts des dispositifs qui sont devenus plus puissants mais plus abordables (Cisco, 2011). Ce chapitre introductif décrit le contexte général de ce projet de maîtrise. En outre, il évoque la problématique existante et les motivations menant à sa réalisation. Une énumération des différentes contributions réalisées est également présentée. Enfin, le plan du mémoire est présenté.

1.2 Contexte général

Face à la forte concurrence présente aujourd'hui sur le marché industriel des nouvelles technologies, améliorer l'efficacité des processus, produire tout en préservant l'environnement et atteindre les objectifs financiers de l'entreprise s'avèrent être des mesures cruciales à mettre en place. Dans ce contexte concurrentiel, la conception des systèmes intelligents et de faible coût permettent d'améliorer la productivité industrielle et l'efficacité des systèmes. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) s'inscrivent parmi les systèmes avantageux grâce aux gains qu'ils apportent en termes de rapidité de déploiement, faible taille, faible coût et auto-organisation. À cet égard, les RCSF jouent un rôle vital dans la création de systèmes industriels très fiables qui répondent rapidement aux événements en temps réel avec des actions appropriées (Erdelj et al., 2013).

En particulier, les réseaux de capteurs sans fil qui sont de plus en plus omniprésents, souffrent de la limitation d'énergie due à la capacité limitée de la batterie des capteurs. Malheureusement, même les avancées technologiques en termes de dispositifs de stockage d'énergie sont limitées et peuvent ne pas être suffisantes pour satisfaire aux exigences des utilisateurs dans le futur. En effet, lorsque la batterie d'un nœud est épuisée, le nœud meurt. Lorsqu'un nombre important de nœuds meurent, le réseau peut ne plus être en mesure d'accomplir la tâche qui lui est désignée. Ainsi, la durée de vie d'un réseau est une caractéristique importante pour un réseau de capteurs et est fortement liée à la durée de vie d'un nœud (Sharma et al., 2008). En même temps, le remplacement des batteries de chaque nœud périodiquement représente un coût exorbitant (Roundy et al., 2004).

Dans ce contexte, les techniques de récolte d'énergie qui visent à recueillir l'énergie à par-

tir de sources d'énergie renouvelables peuvent agir en tant que source d'énergie alternative (Venkataraman and Muntean, 2012). Cette nouvelle technique a récemment émergé comme une approche prometteuse pour réaliser des communications vertes (*green communications*, en anglais) et assurer une durée de vie perpétuelle aux appareils sans fil sans avoir besoin de recharger manuellement la batterie ou la remplacer. Ceci est particulièrement intéressant pour les réseaux de capteurs surtout lorsque ces derniers se trouvent dans certaines conditions extrêmes ou dans des lieux qui sont hors de la portée humaine (Luo et al., 2013).

Afin de tirer profit de son potentiel scientifique et économique, plusieurs agences gouvernementales et des compagnies privées investissent du temps et de l'argent et financent une multitude de projets dans ce domaine (Pele, 2012). Dans (News Reporter-Staff, 2012), des spécialistes estiment qu'une somme de 700 millions \$ a été consacrée à la technique de récolte d'énergie en 2011 et elle atteindra une somme d'environ 5 milliards \$ en 2022.

1.3 Problématique

Considérée comme une technologie qui respecte l'environnement, la récolte d'énergie permettant la conversion de l'énergie ambiante présente dans l'environnement en énergie électrique, suscite de plus en plus d'intérêt. En effet, selon (Sharma et al., 2010), le marché des dispositifs récolteurs d'énergie passera de 10 millions d'unités en 2013 à 18.7 millions d'unités en 2020. Ce grand intérêt vient du fait que cette technologie permet de fournir l'électricité pour les éléments aussi petits que les téléphones cellulaires ou aussi grands que des satellites à partir des sources d'énergie renouvelables (Sharma et al., 2010). En plus de permettre la réalisation d'une communication verte, la récolte d'énergie permet l'autonomie complète des composants. Par conséquent, l'application de cette technique est prometteuse dans les RCSF dont la fourniture d'énergie est le problème le plus important. L'utilisation de la récolte d'énergie ajoute cependant de nouveaux défis à cause du caractère aléatoire de l'arrivée de l'énergie à partir des sources d'énergie renouvelables utilisées (Haenggi, 2005). En effet, l'énergie disponible par la récolte n'est généralement pas constante et elle est hors de notre contrôle. Ceci rend inutilisable les techniques d'allocation de ressources dans les RCSF déjà élaborées. En conséquence, de nouvelles techniques d'allocation de ressources sont nécessaires pour garantir un futur vert du sans fil et lutter contre l'aspect aléatoire de la disponibilité de l'énergie récoltée .

Dans ce contexte, si le nœud utilise son énergie n'importe quand et n'importe comment, il peut tomber en manque d'énergie et donc sera incapable d'accomplir ses tâches ce qui est mauvais vu les applications délicates qu'elles le mettent en jeu. Les réseaux de capteurs peuvent de nos jours être déployés dans des environnements hostiles, des régions très vulnérables.

rables aux catastrophes naturelles ou même incorporés dans le corps humain. En effet, ces applications nécessitent un contrôle perpétuel de la zone où les capteurs sont intégrés. Donc, si ces capteurs meurent à cause d'un manque d'énergie, le collecteur de données ne va pas être en mesure de recueillir les échantillons suffisants pour faire les traitements nécessaires ce qui peut l'induire en erreur lors de la prise de décision quant aux mesures qu'il faut mettre en place. C'est le cas par exemple du contrôle à distance d'un drone qui à cause d'un nombre insuffisant d'échantillons, engendre une perte de contrôle et donc une perte d'argent suite à la chute du drone. Aussi, c'est le cas de contrôle de température des centrales nucléaires à distance où c'est crucial de collecter le plus grand nombre d'échantillons afin d'éviter la perte d'argent et surtout la catastrophe naturelle dûs à l'augmentation soudaine des températures des réacteurs. Par conséquent, on a besoin d'assurer une bonne gestion de l'énergie récoltée par les capteurs afin d'assurer le fonctionnement des nœuds le plus longtemps possible et minimiser le nombre de capteurs qui tombent en manque d'énergie. Ceci agit positivement sur le rendement des applications de contrôle à distance qui nécessitent la collecte d'un nombre d'échantillons suffisants afin de prendre les bonnes décisions au bon moment.

Dans ce cadre, le problème d'ordonnancement ou la sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs dotés des capacités de récolte d'énergie est un problème clé vu qu'il assure une gestion des échantillons récoltés par les centres de traitement de données. En réalité, ce problème a été traité d'une manière très limitée dans la littérature. Pour cette raison, on a évolué à partir des travaux d'ordonnancement analogues dans le domaine des réseaux de communication sans fil. Pour cette raison, ce travail considère ce problème afin de développer des meilleures solutions qui sont à la fois simples et efficaces.

1.4 Objectifs de recherche

L'objectif de ce travail est de sélectionner le plus grand nombre de nœuds afin de maximiser le nombre d'échantillons générés par les capteurs et transférés vers le collecteur de données. Le problème est formulé sous forme d'un programme non linéaire en nombres entiers sous des contraintes de qualité de service en termes de rapport signal sur bruit requis à la réception.

À cause de la complexité exponentielle de la recherche exhaustive, un intérêt particulier est accordé aux algorithmes heuristiques. Ce projet permet donc de développer des algorithmes de sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie. Ces techniques visées sont de faible complexité de calcul mais assurent de bonnes performances.

1.5 Contributions

Ce mémoire étudie le problème de sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie. À notre connaissance, la sélection des nœuds sur le lien ascendant (*uplink*, en anglais) dans un contexte de récolte d'énergie combinée avec un récepteur à antennes multiples implémentant un récepteur *zero-forcing* n'a pas été étudiée dans la littérature.

Afin de résoudre ce problème, les contributions suivantes sont présentées. Ce travail :

- considère et modélise le problème de sélection des nœuds sous la forme d'un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers sous les contraintes de rapport signal-sur-bruit (SNR) et celle de la disponibilité de l'énergie vu qu'on travaille dans le contexte de la récolte d'énergie ;
- prouve que le problème de sélection des nœuds dans le contexte considéré est **NP**-difficile ;
- propose deux algorithmes heuristiques efficaces et simples pour résoudre ce problème ;
- évalue analytiquement la complexité des algorithmes proposés et la compare à celle de l'algorithme optimal ;
- évalue l'équité des deux algorithmes proposés dans différentes conditions liées à la disponibilité de l'énergie et les contraintes de la qualité de service requise ;
- propose une amélioration de l'équité des deux algorithmes en utilisant deux métriques différentes ;
- démontre via les simulations l'efficacité des algorithmes proposés en les comparant à l'algorithme optimal et à un deuxième algorithme de base ; et finalement
- présente l'amélioration nette de l'équité grâce aux métriques ajoutées dans le cas d'une faible équité constatée avec les algorithmes proposés.

1.6 Plan du mémoire

Ce mémoire est organisé de la manière suivante. Le chapitre 2 discute de l'état de l'art du problème de sélection des nœuds. D'abord, il présente un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, il décrit la technique de la récolte d'énergie ainsi que les systèmes à antennes multiples. Enfin, il présente les différents travaux qui ont été effectués précédemment, surtout dans le cadre de l'ordonnancement et l'équité. Le chapitre 3 fournit une description détaillée du modèle de système adopté dans ce projet puis modélise et formalise mathématiquement le problème abordé. Ce même chapitre présente également une preuve de la **NP**-difficulté du problème traité. Par la suite, le chapitre 4 présente les différents algorithmes proposés pour résoudre ce problème et une analyse de leurs complexités. Dans le

chapitre 5, les résultats des simulations comparant les performances des algorithmes proposés sont présentés. Le chapitre 6 présente l'amélioration apportée en terme d'équité ainsi que les résultats numériques obtenus. Finalement, le chapitre 7 vient pour conclure ce mémoire et présenter les limites des solutions proposées ainsi que quelques ouvertures d'horizon.

1.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une description du cadre général de ce projet de recherche de maîtrise. En outre, il a cerné la problématique existante et les motivations derrière la réalisation de ce projet. Il a également identifié les objectifs et les contributions effectuées.

CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS ET REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont en plein essor ces dernières années vu leurs applications dans la surveillance des conditions physiques ou environnementales. La question la plus importante dans les RCSF est comment atteindre un rendement énergétique élevé des capteurs qui sont généralement alimentés par des batteries ayant une capacité de stockage limitée ainsi qu'une manipulation difficile à assurer manuellement. Parmi l'ensemble des recherches qui ont été proposées, il y avait l'idée d'utiliser la récolte d'énergie à partir des sources d'énergie ambiantes afin de pallier aux problèmes comme la durée de vie limitée des nœuds dans un RCSF. Afin de rendre les transmissions des données plus efficaces, les systèmes à antennes multiples sont utilisés. Ce chapitre présente d'abord les réseaux de capteurs sans fil. Puis, il décrit le concept de récolte d'énergie ainsi que les systèmes à antennes multiples. Enfin, une revue de littérature suivra afin de présenter les orientations de la recherche réunissant ces techniques dans les travaux antérieurs en termes d'ordonnancement et d'équité.

2.2 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Dans le domaine des télécommunications, les RCSF représentent un domaine de recherche actif avec de nombreux ateliers et conférences organisés chaque année. Dans l'ensemble, cette section présente un aperçu général sur les RCSF. Elle présente leur définition, leurs caractéristiques, leurs applications ainsi que les défis envisagés.

2.2.1 Définition

Une définition générale d'un capteur sans fil peut être formulée comme suit : « un petit appareil sans fil capable de répondre à un ou plusieurs stimuli engendré par un changement dans un état physique ou chimique, comme la chaleur, la lumière, la pression ou la vibration et génère un signal qui peut être mesuré » (Kabara, 2005).

Après avoir défini ce qui est un capteur, on est maintenant en mesure de définir ce qu'est un réseau de capteurs sans fil (RCSF). En règle générale, ces réseaux sont formés de dispositifs autonomes utilisant des capteurs sans fil spatialement distribués et collaborant pour surveiller des conditions physiques ou environnementales. Une fois un événement est détecté ou mesuré, les valeurs des mesures effectuées doivent être transmises via un support sans fil à un ou

plusieurs collecteurs de données pour récolter les mesures appropriées (Akyildiz et al., 2002).

Les RCSF sont différents des autres réseaux sans fil car ils sont dotés des caractéristiques suivantes : une haute densité, une capacité de stockage d'énergie limitée et un environnement de déploiement généralement inaccessible. Ces deux dernières caractéristiques rendent difficile et parfois impossible le rechargement ou le remplacement manuel des batteries des capteurs.

2.2.2 Caractéristiques

Les caractéristiques spécifiques des RCSF les diffèrent des autres réseaux sans fil. Dans ce qui suit, on présente les principales caractéristiques de ce type de réseaux sans fil.

- **Sites de déploiement :**

Souvent, quand on parle de réseaux de capteurs et leurs applications potentielles, on s'attend à les employer dans des situations où l'interaction humaine avec le réseau physique est quasiment impossible tel qu'un gigantesque immeuble de bureaux, une région dangereuse ou même à l'intérieur du corps humain.

- **Spécificité des composants :**

Chaque nœud dans un réseau de capteurs est généralement équipé d'un émetteur-récepteur radio, un petit microcontrôleur et une source d'énergie (couramment une batterie). Dans la plupart du temps, les capteurs utilisent des circuits électroniques qui réduisent au minimum la consommation d'énergie (Akyildiz et al., 2002).

- **Taille et coût des composants :**

La taille prévue d'un capteur peut varier selon l'appareil dans lequel il est installé. De nos jours, la tendance de la technologie de réseau de capteurs est caractérisée par des dimensions réduites voir de l'ordre d'un grain de poussière. Le coût des capteurs est également variable, allant de quelques centaines de dollars à quelques cents. Il varie en fonction de la taille du RCSF et la complexité requise pour les capteurs individuels. La taille et le coût liés aux exigences requises au niveau des capteurs entraînent des contraintes sur les ressources telles que l'énergie, la mémoire, la vitesse de calcul et la bande passante. La tendance actuelle de la technologie de réseau de capteurs est caractérisée par des facteurs de forme réduite, un matériel à faible coût et un processeur de faible puissance.

- **Actions assurées par un capteur :**

Dans un RCSF, chaque nœud est à la base capable de détecter des données de l'environnement surveillé, de générer les bits d'information correspondants et de les stocker pour les transmettre ultérieurement. Le capteur peut éventuellement faire un calcul mais cette opération dépend de sa capacité de traitement.

2.2.3 Limites des sources d'énergie existantes

Stocker de l'énergie dans une batterie du nœud, distribuer la puissance au nœud via un fil ou récolter l'énergie ambiante sont les principales méthodes pour fournir de l'énergie aux nœuds sans fil (Roundy et al., 2004). Dans ce qui suit, les sources d'alimentation de chacune des méthodes précitées sont examinées.

Les réservoirs d'énergie

– Les batteries macro-échelles :

Les batteries électrochimiques (batteries primaires) étant la principale forme de stockage et de livraison de la puissance pour les appareils électroniques au cours des 100 dernières années, leur considération pour une utilisation dans les réseaux de capteurs sans fil est naturelle. Les piles primaires sont peut-être la source la plus polyvalente parmi toutes les petites sources d'énergie. Leur densité d'énergie est la principale mesure intéressante. Le tableau 2.1 donne un exemple de cette densité pour trois types de batteries chimiques différentes.

Tableau 2.1 Comparaison de la densité d'énergie pour différentes batteries électrochimiques (Roundy et al., 2004)

Matière chimique	Zinc	Lithium	Alkaline
Energie (J/cm^3)	3780	2880	1200

Aux batteries primaires, s'ajoutent les batteries secondaires (batteries rechargeables) qui sont principalement utilisées pour alimenter les ordinateurs portables et les téléphones cellulaires. Dans le contexte des réseaux sans fil, l'inconvénient sera la nécessité d'avoir des sources primaires afin de recharger chaque dispositif.

Grâce à la tension constante fournie par les batteries, les appareils sont alimentés directement à partir des batteries sans des circuits intermédiaires. Ceci permet de conserver l'énergie consommée par ces dispositifs électroniques.

– Les batteries micro-échelles : Cette catégorie des batteries représente des batteries mais de tailles plus petites que les batteries macro-échelles (Roundy et al., 2004).

– Supercondensateurs :

Ils représentent un compromis entre les batteries rechargeables et les condensateurs usuels. Les supercondensateurs sont caractérisés par une longue vie et un temps de rechargement court. Ceci les rend adaptés à quelques applications des réseaux de capteurs mais pas pour toutes vu qu'il nécessitent une intervention pour les recharger (Roundy et al., 2004).

Distribution de puissance

Cette méthode consiste à transmettre la puissance à des capteurs sans fil via des fils, des émetteurs acoustiques ou des lasers. Cependant, aucune de ces méthodes n'est appropriée pour les réseaux de capteurs sans fil car l'utilisation des fils à un dispositif de communication sans fil s'oppose au but des communications sans fil (Roundy et al., 2004).

2.2.4 Applications des réseaux de capteurs sans fil

Au cours des dernières années, les RCSF ont pris de l'ampleur en raison de la progression des unités et des améliorations dans les technologies radio de faible puissance. À l'origine, la motivation initiale derrière la recherche sur les RCSF était des applications militaires. Comme les coûts de nœuds de capteurs et des réseaux de communication ont été réduits, de nombreuses autres applications potentielles, y compris celles utilisées à des fins civiles et environnementales ont vu le jour. Dans ce qui suit, une explication plus détaillée des différentes applications est présentée.



Figure 2.1 Applications des réseaux de capteurs (NICS labs, 2014)

- **Surveillance des conditions :**

La surveillance des conditions couvre la détection de la présence humaine, les vibrations des objets, le son , le stress, l'accélération, la puissance, etc.

- **Surveillance de l'environnement :**

Ce domaine couvre le plus grand champ d'application des RCSF de nos jours. En effet,

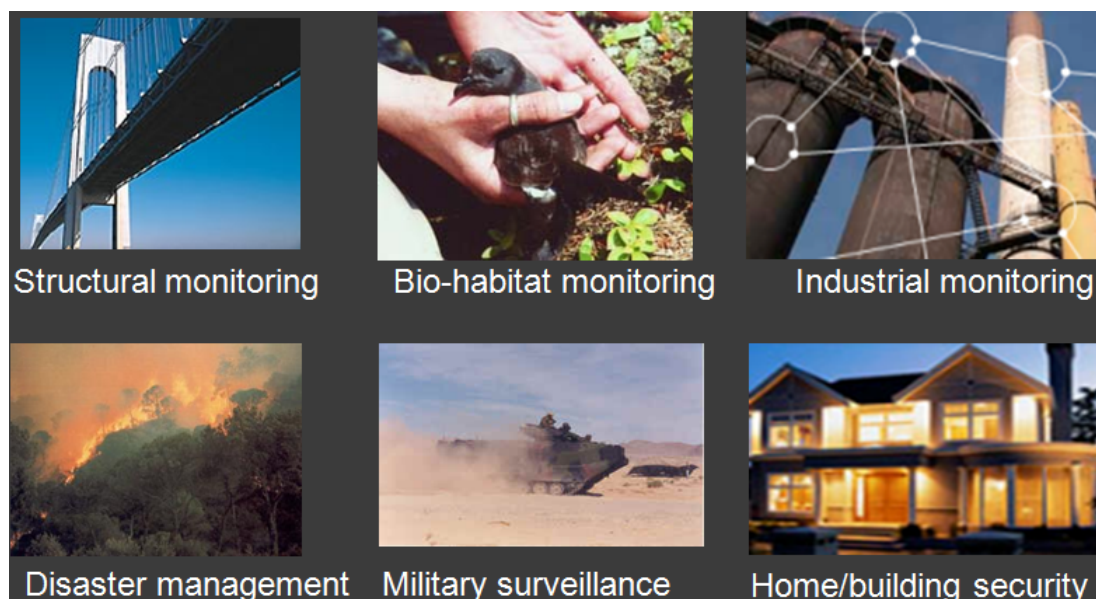


Figure 2.2 Applications des réseaux de capteurs (Putra, 2014)

il englobe la surveillance de l'état de l'air ambiant, la qualité des eaux (par exemple le contrôle de leur degré de pollution, etc), le contrôle des environnements dangereux surtout ceux qui sont vulnérables aux incendies, inondation ou glissement de terrain. En outre, ce domaine d'application inclut les prévisions de la météo (Erdelj et al., 2013).

– **Surveillance de la santé :**

L'implantation des capteurs à des fins de santé est un domaine interdisciplinaire qui a révolutionné le système de soins à distance en permettant la surveillance de la santé peu coûteuse et continue avec des mises à jour en temps réel des dossiers médicaux via Internet. En effet, les RCSF peuvent être intégrés dans le bâtiment d'un hôpital pour suivre et surveiller les patients et toutes les ressources médicales. Il existe des types spéciaux de capteurs qui peuvent mesurer la pression artérielle, la température corporelle et des capteurs sous forme d'électrocardiographes qui peuvent même être tricotés en vêtements pour fournir des soins infirmiers à distance pour les personnes âgées (Wang and Zhang, 2010).

– **Contrôle du trafic routier :**

Les réseaux de capteurs sont utilisés pour la surveillance des déplacements des véhicules ainsi que les feux de circulation. Les caméras vidéo sont également fréquemment utilisées pour surveiller les segments de route à fort trafic et permettent entre autres d'aider les conducteurs à trouver des places de stationnement inoccupées et éviter les embouteillages (Wang and Zhang, 2010).

Les figures 2.1 et 2.2 donnent plus d'exemples d'applications des réseaux de capteurs sans fil.

2.2.5 Défis envisagés

La mise en place des RCSF est une tâche extrêmement difficile à cause de plusieurs facteurs. Cette section fournit une description générale utile pour les concepteurs des RCSF.

– **Durée de vie opérationnelle des composants :**

Fortement dépendante de sa gestion d'alimentation, la durée de vie d'un capteur est l'une des questions clés dans toutes les applications impliquant des RCSF. L'énergie est stockée dans des batteries qui ne sont souvent pas censées être rechargées ou remplacées. Ainsi, l'énergie doit être préservée. Dans ce contexte, deux façons sur les plans logiciel et matériel peuvent aider à atteindre cet objectif.

Du point de vue matériel, on peut pallier à ce problème avec un choix judicieux des composantes comme celles qui sont à faible consommation d'énergie sans altérer la capacité nécessaire ou inclure des modules qui convertissent l'énergie ambiante en une énergie électrique utile à leur fonctionnement (voir section 2.3).

Du point de vue logiciel, l'énergie peut être préservée en contrôlant le nombre ainsi que la fréquence de messages à envoyer et la puissance d'émission tout en préservant la qualité de service prévue. Ceci découle du fait que plus la quantité de données envoyée augmente, plus les interférences qui en découlent augmentent. Du coup, la consommation d'énergie croît (Erdelj et al., 2013).

– **Hétérogénéité :**

L'hétérogénéité des données recueillies est un autre défi qui s'impose avec l'utilisation des RCSF. Pour traiter cette hétérogénéité, le RCSF a besoin de systèmes d'agrégation des données pour leur acquisition et leur transmission ainsi que de puissantes techniques d'analyse des données pour leur réception (Erdelj et al., 2013).

– **Fiabilité :**

Les capteurs utilisés pour des fins de surveillance doivent fournir des informations précises et en temps réel sur le processus contrôlé, même dans des environnements industriels difficiles, dans des conditions de vibrations, de bruit, d'humidité, ou des températures extrêmes. Le lot d'information recueilli au cours du processus de surveillance est vital pour le fonctionnement du système approprié, puisque même les plus petites erreurs peuvent avoir des conséquences fatales pour les mesures prises par l'application (Erdelj et al., 2013).

– **Sécurité :**

Les RCSF sont très vulnérables aux attaques en raison de leur déploiement sans surveillance humaine (Wang and Zhang, 2009).

2.3 La récolte d'énergie

Comme il a été mentionné dans la section précédente, les RCSF forment une classe de réseaux sans fil qui doivent faire face à plusieurs défis comme la fiabilité et la robustesse dans des environnements difficiles. En outre, les dispositifs qui forment les RCSF devraient avoir une longue durée de vie et un faible coût, un compromis difficile à satisfaire. À ces termes, la technologie de la récolte d'énergie s'avère intéressante à utiliser comme source d'énergie potentielle au lieu des techniques citées dans la section 2.2.3.

Cette section introduit le concept de la récolte d'énergie puis explicite ses principales techniques et son importance pour les RCSF.

Remarque

Les termes récupération, accumulation et récolte d'énergie sont utilisés pour désigner le même concept. Dans ce mémoire, on va opter pour un seul terme qui est la récolte d'énergie.

2.3.1 Définition de la récolte d'énergie

La récolte d'énergie est la conversion de l'énergie ambiante présente dans l'environnement en une énergie électrique et son stockage dans des unités comme des batteries. L'énergie ambiante est naturelle, de nature non-électrique, et renouvelable. Toutefois, le principal avantage de la récolte d'énergie est d'éliminer la nécessité de mettre en place des fils ou de faire des visites fréquentes pour remplacer les batteries des dispositifs (Kazmierski and Beeby, 2010).

2.3.2 Sources d'énergie

En général, il existe différents types de sources d'énergie à partir desquelles il est possible de récolter l'énergie. Le rendement d'une source dépend essentiellement de l'emplacement du récolteur d'énergie vis à vis cette source. Le choix de la source dépend essentiellement de l'application en question. Par exemple à l'intérieur, l'éclairage artificiel peut fournir assez de puissance pour les applications de faible puissance, telles que les calculatrices.

Le processus de la récolte d'énergie peut obtenir de l'énergie utilisable à partir de sources naturelles qui nous entourent dans l'environnement de tous les jours, telles que le mouvement physique, les ondes électromagnétiques, les rayons du soleil, le vent, les vagues de l'océan, les courants des rivières et les ondes sonores (Bickerstaffe, 2011).

2.3.3 Techniques de la récolte d'énergie

Dans ce qui suit, quelques exemples des techniques de récolte d'énergie fréquemment utilisées sont présentées.

- **Conversion de l'énergie mécanique**

L'énergie mécanique peut être trouvée presque partout où les RCSF sont déployés, ce qui rend la conversion de l'énergie mécanique à partir des vibrations ambiantes en énergie électrique une approche intéressante pour l'alimentation des capteurs sans fil. La récolte d'énergie mécanique signifie la conversion de l'énergie mécanique en électricité en utilisant les vibrations, la pression, les moteurs à haute pression et la force (Basagni et al., 2012).

- **Conversion de l'énergie photovoltaïque**

La récolte de l'énergie photovoltaïque est le processus de conversion des photons provenant des sources telles que la lumière solaire ou artificielle en électricité. À partir de l'énergie photovoltaïque, on peut produire des niveaux plus élevés d'électricité par rapport à d'autres techniques de récolte d'énergie. Ceci rend ces sources convenables aux systèmes de récolte d'énergie à grande échelle (Basagni et al., 2012). Cependant, la puissance générée et l'efficacité du système dépendent fortement de la disponibilité de la lumière et des conditions environnementales ainsi que des matériaux utilisés (Chalasani and Conrad, 2008).

- **Conversion de l'énergie thermique**

La récolte d'énergie thermoélectrique repose sur la production de l'énergie électrique à partir de la différence de température. Cette technique consiste généralement en l'utilisation de générateurs thermoélectriques (Roundy et al., 2004). Le récolteur d'énergie accumule l'énergie électrique lorsqu'une tension est créée par deux métaux joints à deux jonctions qui sont maintenues à des températures différentes. La différence de tension est proportionnelle à la différence de température entre les plaques chaudes et froides. L'énergie est récoltée tant que la différence de température est maintenue (Bickerstaffe, 2011). La récolte d'énergie thermoélectrique fournit des niveaux d'énergie récoltés élevés.

- **Conversion de l'énergie chimique**

La récolte d'énergie chimique est le processus de conversion de l'oxygène et des substances endogènes en électricité par l'intermédiaire de réactions électrochimiques. En particulier, les cellules de biocarburants agissant comme enzymes actives et les catalyseurs peuvent être utilisés pour convertir l'énergie biochimique en énergie électrique. Parmi ceux-ci, le glucose est considéré comme la source la plus commune des combustibles utilisés. Même si la récolte d'énergie biochimique peut être supérieure à d'autres techniques de récolte d'énergie en termes de puissance de sortie continue, son rendement est fonction du type et de la disponibilité des piles à combustible (Bickerstaffe, 2011).

– **Conversion de l'énergie acoustique**

La récolte de l'énergie acoustique est le processus consistant à convertir les ondes acoustiques de l'environnement en énergie électrique au moyen d'un résonateur. En règle générale, la récolte d'énergie acoustique est utilisée dans le cas des endroits éloignés ou isolés, ou des systèmes fermés où le câblage et les commutations électriques sont difficiles à utiliser. Cependant, l'efficacité de la puissance acoustique récoltée est faible et une telle énergie ne peut être récoltée que dans des environnements très bruyants (Bickerstaffe, 2011).

– **Récolte de l'énergie à partir du corps humain**

Le corps humain constitue une source intéressante pour la production d'énergie à partir de la dissipation de chaleur, des rotations, l'application du poids du corps ainsi que la déformation élastique des tissus et autres accessoires. En effet, (Roundy et al., 2004) estime que le corps humain brûle en moyenne environ 10,5 MJ d'énergie par jour, ce qui est l'équivalent d'une dissipation de puissance moyenne de 121 W. Cela ouvre des possibilités de récolte d'énergie pour alimenter des dispositifs médicaux implantables ou mobiles qui pourraient être utilisés pendant une longue période ou être rechargés en permanence.

Dans ce qui suit, on cite quelques appareils de mouvement humain utilisés pour la récolte d'énergie (Pele, 2012). Parmi les sources possibles, on trouve l'oreille. En effet, on peut récolter l'énergie en utilisant le potentiel électrique de la cochlée comme une batterie biologique qui est essentielle pour transformer les ondes de pression sonores en signaux électriques envoyés au cerveau. Les chercheurs ont mis au point une puce qui peut exploiter cette énergie électrique sans interférer avec une audition normale telle qu'illustré dans la figure 2.3. Des chercheurs français ont aussi développé un stimulateur cardiaque de faible puissance ($5\mu\text{W}$ au lieu de $25\mu\text{W}$ dans les stimulateurs actuels) alimenté par l'énergie mécanique de battements cardiaques d'un patient. L'objectif est d'éliminer le besoin de batteries, qui devaient être remplacé chirurgicalement tous les six à dix ans. Ce système est illustré par la figure 2.4. João Paulo Lammoglia, un designer industriel basé à Londres, a créé un masque qui convertit l'énergie éolienne fournie par la respiration du porteur en électricité pour la recharge de petits appareils électroniques. À l'intérieur de l'unité, il y a des petites éoliennes qui font la conversion et l'énergie est transférée par l'intermédiaire d'un câble au petit appareil électronique. Ce masque est présenté à la figure 2.5.

– **Conversion de l'énergie des signaux radio fréquence (RF)**

Il est possible de récolter l'énergie à partir des signaux radio fréquence (RF) qui se propagent dans l'air. Par exemple, à partir des signaux Wifi, les signaux de signalisation dans les réseaux cellulaires, etc. Cette technique de récolte d'énergie requiert une densité suffisante de signaux RF pour être effective.

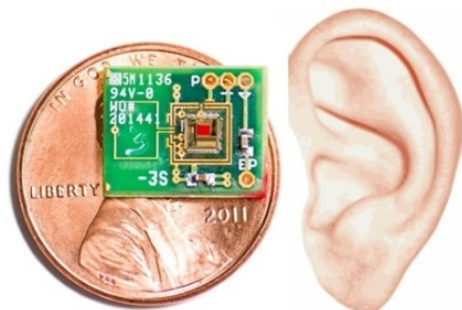


Figure 2.3 Récolteur d'énergie d'oreille (Pele, 2012)

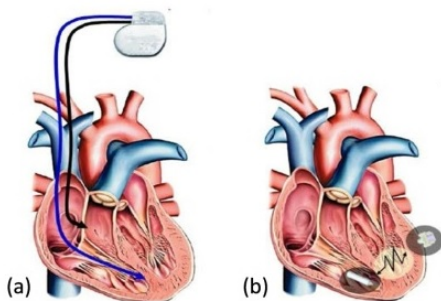


Figure 2.4 Récolteur d'énergie du cœur (Pele, 2012)



Figure 2.5 Récolteur d'énergie à partir des mouvements de transpiration (Pele, 2012)

2.3.4 Avantages

Nous pouvons utiliser la récolte d'énergie pour fournir de l'électricité pour les éléments aussi petits que les capteurs ou aussi grands que les satellites. Les principales raisons de son

utilisation sont (Wang et al., 2011) :

– **Commodité :**

Les consommateurs ne sont pas soucieux de changer ou de recharger les batteries pour les appareils tels que les ordinateurs portables ou les téléphones cellulaires ou d'autres appareils électroniques.

– **Sauvegarde d'énergie :**

De tels dispositifs récolteurs d'énergie peuvent servir comme alternative aux sources d'énergie primaires. En d'autres termes, ils représentent un secours et constituent une solution aux coupures de courant. Par exemple, ceci est important pour les hôpitaux qui ont besoin d'énergie, surtout lors des pannes des sources primaires.

– **Pratiques commerciales :**

Les coûts proposés aux consommateurs seraient réduits en termes d'emballage, de développement, d'élimination, de longévité et de réutilisation de certains produits. L'installation et la maintenance du produit aurait également un coût réduit. Un exemple est celui des coûts qui seraient enregistrés avec l'élimination des batteries et des chargeurs chimiques, ainsi que le vaste câblage exigés normalement dans l'utilisation des téléphones cellulaires.

2.4 Les systèmes à antennes multiples

L'utilisation des systèmes à multi-émetteurs multi-récepteurs communément connus sous le nom de systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output), est l'une des plus grandes avancées technologiques au niveau de la conception des systèmes de communication sans fil. En effet, équiper les appareils sans fil et en particulier les capteurs sans fil de plusieurs antennes aide à améliorer l'efficacité spectrale et la diversité dans un système de communications sans fil. Ces avancements viennent principalement changer la manière avec laquelle on voit le phénomène de multi-trajets. La nouvelle vision consiste à le considérer plutôt comme un atout pour améliorer la qualité des signaux à la réception grâce à la multitude des canaux créés entre l'émetteur et le récepteur et non pas comme un phénomène destructeur à cause des distorsions qu'il peut engendrer.

Cette section présente un aperçu général des différentes configurations existantes, les principaux récepteurs utilisés dans les systèmes à antennes multiples ainsi que les gains offerts par l'utilisation de ce genre de systèmes.

2.4.1 Configurations existantes

Il existe différents types de configurations possibles pour les systèmes à antennes multiples dans le cas d'une communication point à point. En effet, la configuration « single-input single-output » (SISO) est la configuration de base de laquelle dérive la configuration « single-input multiple-output » (SIMO) avec une antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception ainsi que la configuration « multiple-input multiple-output » (MIMO) avec plusieurs antennes à l'émission et une seule antenne à la réception. Avec plusieurs antennes au niveau des deux extrémités, la configuration est appelée MIMO. Dans le cas d'une station de base disposant de plusieurs antennes qui communiquent avec plusieurs utilisateurs possédant chacun une ou plusieurs antennes, la configuration est une configuration MIMO multiutilisateurs ou en anglais « multiuser MIMO » (MU-MIMO) (Paulraj et al., 2003). Les figures 2.6 et 2.7 illustrent graphiquement les différentes configurations précitées.

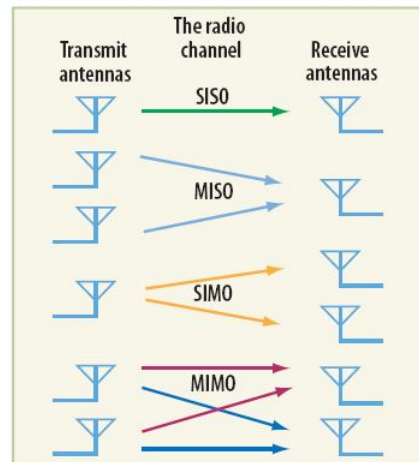


Figure 2.6 La configuration MIMO et ses dérivées (Whitacre et al., 2008)

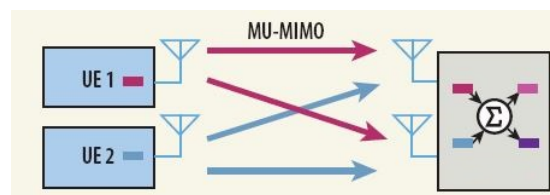


Figure 2.7 La configuration de MIMO multiutilisateurs (Whitacre et al., 2008)

2.4.2 Récepteurs utilisés

Les récepteurs utilisés pour détecter les signaux reçus dans les systèmes à antennes multiples sont nombreux. Cette section présente un aperçu général des récepteurs fréquemment utilisés dans ces systèmes.

Les récepteurs linéaires :

La linéarité de ces récepteurs vient du fait que l'estimation du vecteur de symboles reçu avant la décision s'obtient par une transformation linéaire de ce vecteur reçu. Les algorithmes de détection linéaires se caractérisent principalement par leur simplicité et permettent de séparer les symboles de données transmis. Cette séparation permet au récepteur de décoder les symboles d'une manière indépendante l'un de l'autre. Parmi les récepteurs linéaires les plus utilisés, on cite le récepteur par forçage à zéro (*zero forcing*, en anglais) ZF et le récepteur « minimum mean square error » (MMSE). Dans la suite, on suppose avoir un système MIMO avec M_t antennes à l'émission et M_r antennes à la réception. Le vecteur reçu \mathbf{y} prend la forme suivante :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w},$$

où \mathbf{H} , \mathbf{x} et \mathbf{w} représentent respectivement la matrice du canal, le vecteur de symboles envoyés et le vecteur du bruit additif.

– Le récepteur ZF :

Le récepteur ZF consiste à multiplier le signal reçu par le pseudo-inverse de la matrice des canaux. Le vecteur estimé est donné par cette formule :

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^* \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^* \mathbf{y} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{y},$$

où \mathbf{H}^* et \mathbf{H}^\dagger désignent la matrice trans-conjuguée et la matrice pseudo-inverse de la matrice \mathbf{H} , respectivement. Cette méthode permet de découper la matrice des canaux en des canaux parallèles. La matrice \mathbf{H}^\dagger n'existe que lorsque le nombre de lignes est supérieur ou égal au nombre de colonnes. En d'autres termes, avoir un nombre d'antennes à l'émission inférieur ou égal au nombre d'antennes à la réception est une condition essentielle pour l'existence du pseudo-inverse de la matrice \mathbf{H} . Par exemple, pour un système à plusieurs émetteurs où chacun est équipé d'une seule antenne (le nombre total des antennes à l'émission est M_t) et un récepteur à M_r antennes où $M_t \geq M_r$, une sélection des nœuds est nécessaire pour assurer le fonctionnement du système. Ce sujet sera traité dans le chapitre 3.

En outre, $(\mathbf{H}^*\mathbf{H})^{-1}$ n'existe que lorsque les colonnes ou les lignes de la matrice \mathbf{H} sont indépendantes. En réalité, cette hypothèse est triviale car pour les canaux pratiques, les éléments de la matrice \mathbf{H} sont indépendants (Zielke, 1994).

Finalement, il faudra noter que le récepteur ZF fournit des performances sous-optimales vu qu'il entraîne une amplification du bruit. Toutefois, son implémentation est très simple et il permet l'élimination complète de l'interférence inter-symboles (Paulraj et al., 2003).

– **Le récepteur MMSE :**

Le récepteur MMSE est basé sur la minimisation de l'erreur quadratique moyenne. Il consiste à multiplier le vecteur des symboles envoyés par une matrice \mathbf{K} de la manière suivante :

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{K}\mathbf{y}$$

telle que :

$$\mathbf{E} \left[\|\mathbf{x} - \mathbf{K}\mathbf{y}\|^2 \right] \text{ est minimale.}$$

La matrice \mathbf{K} est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{K} = \left(\frac{1}{\rho} \mathbf{I}_{M_t} + \mathbf{H}^*\mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H},$$

où ρ représente le rapport signal sur bruit (SNR) par antenne réceptrice.

Le récepteur MMSE équilibre l'atténuation de l'interférence inter-symboles avec l'amélioration du signal reçu en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

Observations

1. Contrairement au récepteur ZF, le récepteur MMSE n'amplifie pas le bruit.
2. Les récepteurs ZF et MMSE ont le même ordre de diversité (la notion de diversité sera expliquée ultérieurement).
3. Les récepteurs linéaires sont très intéressants en raison de leur simplicité et la linéarité des opérations matricielles effectuées lors de la détection.
4. Les récepteurs linéaires ne peuvent pas être utilisés dans le cas où $M_t > M_r$ sauf si une stratégie de sélection des antennes est mise en œuvre.

Les récepteurs non linéaires :

Dans cette catégorie des récepteurs, on cite le récepteur de maximum de vraisemblance et le récepteur par annulation successive d'interférences.

– Le récepteur de maximum de vraisemblance :

Le récepteur de maximum de vraisemblance ou ce qu'on appelle en anglais « Maximum Likelihood » (ML) est le récepteur optimal. Il établit l'estimation du vecteur de symboles envoyés par la relation :

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{i}{\operatorname{argmin}} || \mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{s}_i ||,$$

où \mathbf{s}_i représente un vecteur formé par les éléments de la constellation considérée. Ce récepteur parcourt exhaustivement, pour l'ensemble des antennes, tout l'ensemble des signaux appartenant à la constellation pour décider le signal le plus probablement envoyé. À cause de cette recherche exhaustive, la complexité d'un tel récepteur est énorme et augmente exponentiellement avec le nombre d'antennes surtout lorsqu'il s'agit d'une constellation à plusieurs points. Ceci rend son implémentation compliquée et son utilisation non pratique (Paulraj et al., 2003).

– Le récepteur par annulation successive d'interférences :

Ce type de récepteurs constitue un compromis entre les détecteurs optimaux de haute performance mais de grande complexité et les algorithmes linéaires moins performants et relativement faciles à mettre en place dans la pratique. L'approche dans ce cas consiste à détecter les signaux d'une manière séquentielle et à annuler successivement l'effet des interférences sur les autres signaux non encore détectés par soustraction des signaux déjà détectés. À chaque étape de l'algorithme, on choisit le flux ayant le plus haut rapport signal sur bruit plus interférences SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) pour être décodé.

Observations

1. En utilisant les récepteurs non-linéaires, on n'a pas besoin de calculer l'inverse de la matrice des canaux mais la complexité croît exponentiellement avec M_t et la grandeur de la constellation.
2. Les récepteurs demeurent fonctionnels même dans le cas où $M_t > M_r$.

2.4.3 Gains réalisés avec l'utilisation des systèmes à antennes multiples

L'idée d'utiliser des systèmes à antennes multiples a révolutionné le domaine des télécommunications et celui de la théorie de l'information. À l'époque, le but était d'approcher les

limites des performances et explorer des techniques de codage et modulations efficaces à ce type de systèmes. Un peu plus tard, les bienfaits de ces systèmes se sont avérés plus intéressants que les avantages visés au départ. En effet, ces systèmes permettent l’augmentation du débit ainsi que la qualité du signal à la réception mesurée par la métrique rapport signal sur bruit. Cette augmentation du SNR découle de la collaboration des antennes favorisant la combinaison cohérente des signaux à l’émetteur ou au récepteur et donc un signal résultant de meilleure qualité (Paulraj et al., 2003). À ce type de gain appelé le « array gain », s’ajoute le gain de diversité utilisé essentiellement pour combattre l’évanouissement. Par exemple, dans le cas de SIMO, le récepteur est capable de combiner les différentes versions du même signal qui ont subi des évanouissements indépendants pour enfin avoir un signal résultant plus robuste que les signaux individuels dégradés.

Pour un système MIMO, on note aussi le gain de multiplexage lorsque le message de l’émetteur est divisé en plusieurs parties envoyées sur les différentes antennes émettrices. À la réception, le signal est perçu sur chacune des antennes réceptrices pour enfin être reconstitué à partir des différents fragments combinés. Le gain de multiplexage ainsi que la possibilité d’envoyer en parallèle plusieurs messages appartenant à plusieurs utilisateurs dans le cas d’un système MU-MIMO contribuent à l’augmentation du débit. En outre, dans le cas d’un système MU-MIMO, on peut tirer profit d’un autre type de gain qui est le gain de diversité multiutilisateurs. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas d’un ordonnancement des utilisateurs (*user scheduling*, en anglais) puisqu’avoir plusieurs utilisateurs avec des évanouissements indépendants garantit d’avoir presque toujours un utilisateur avec un bon canal.

2.5 Revue de littérature

La nature collaborative des RCSF par rapport aux réseaux filaires attire l’attention des chercheurs pour l’autonomie de leurs composants, leur déploiement facile, leur flexibilité et leur capacité de traitement (Tuna et al., 2013). Les orientations des chercheurs sont très diversifiées incluant l’allocation des ressources qui vise à équilibrer les ressources allouées pour l’utilisation selon plusieurs facteurs comme la disponibilité des données et l’état du canal (Hentati et al., 2015) ainsi que des problèmes d’ordonnancement qui ont généralement pour objectif la maximisation du débit de transmission (Kashef and Ephremides, 2012) ou la minimisation des délais de livraison des données de l’émetteur au récepteur (Yang and Ulukus, 2012). La plupart des travaux proposés dans la littérature supposent que l’acquisition de données consomme beaucoup moins d’énergie que leur transmission. Voilà pourquoi, l’énergie consommée pour la détection de données a toujours été négligée dans la littérature, comme le cas de (Rubio, 2013). Malheureusement, cette hypothèse n’est pas raisonnable dans la

pratique où la consommation d'énergie de la détection peut être comparable à celle de la transmission. La liste des orientations est encore très longue. Mais, on va plutôt se concentrer sur les problématiques proches du travail proposé dans ce mémoire.

2.5.1 L'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement (*scheduling*, en anglais) est parmi les problèmes les plus étudiés dans la littérature. En effet, il touche diverse domaines d'applications, y compris, la robotique (Hovland and McCarragher, 1997), le placement des capteurs dans les structures (Hovland and McCarragher, 1997), le suivi des cibles (Isler and Bajcsy, 2005), le contrôle des centrales chimiques (Kookos and Perkins, 1999) et les réseaux sans fil (Kookos and Perkins, 1999).

L'ordonnancement est un problème générique qui peut prendre plusieurs formes à savoir la sélection des nœuds qui est analogue au problème de sélection des utilisateurs et la sélection des antennes. Dans (Yang, 2014) ainsi que (Yang et al., 2015), les auteurs considèrent la sélection des nœuds dans le cadre de la maximisation de l'utilité d'un réseau de capteurs. Cette utilité est représentée par une fonction proportionnelle au nombre de nœuds sélectionnés pour des fins de détection des informations et leur transfert au collecteur de données. Les deux politiques d'ordonnancement en ligne et hors ligne sont étudiées. Afin de résoudre ces deux cas, des algorithmes heuristiques sont proposés et une majoration de la solution optimale est aussi explicitée. Dans (Joshi and Boyd, 2009), le problème de fréquence de sélection des capteurs est étudié en utilisant l'optimisation convexe visant à minimiser l'erreur estimée.

Le travail de (Phan and Le-Ngoc, 2013) étudie le problème d'ordonnancement dynamique de la puissance optimale dans les réseaux sans fil multicanaux et multiutilisateurs. Les utilisateurs ont des exigences de qualité de service sur les débits minimaux avec des garanties de retard statistiques. Un seul utilisateur est autorisé à émettre sur un canal pendant un intervalle de temps donné. Ce travail tient compte des deux scénarios : les utilisateurs homogènes (c.-à-d., mêmes exigences requises pour tous les nœuds) et hétérogènes (c.-à-d., des exigences différentes requises pour tous les nœuds). Pour le premier scénario, la politique d'ordonnancement optimal peut être dérivée. Pour le deuxième, un algorithme d'ordonnancement en ligne pour la politique optimale est proposée sans la connaissance des statistiques d'évanouissement à priori. Les auteurs de (Györke, 2012) proposent un système de planification prédictive pour indiquer dynamiquement le bon moment de la mesure des capteurs. Ce système d'ordonnancement est basé sur la connaissance préalable de l'environnement et des capteurs, les connaissances expérimentales recueillies déjà et la prédiction de l'avenir. Un scénario a été simulé pour un exemple de capteurs impliqués dans la surveillance de santé

à domicile. L'idée proposée dans (Chen et al., 2014) consiste en un schéma qui caractérise l'état d'un système à partir des perspectives d'utilisation du système et de l'énergie récoltée pendant une certaine période de temps. Une partie de l'énergie de la batterie est attribuée à un groupe de tâches relatives à la période de temps en considérant conjointement l'état d'utilisation du système et de l'énergie. La fréquence de fonctionnement est sélectionnée en fonction de l'énergie allouée et affinée pour améliorer encore l'efficacité énergétique lorsqu'une surcharge se produit. Dans (Koga et al., 2015), un système adaptatif de sélection de relais est proposé. Dans ce système, chaque nœud change de façon adaptative le critère pour être un candidat relais ou non sur la base du taux d'énergie récolté. Des simulations démontrent que ce schéma de sélection de relais permet d'obtenir de meilleur débit que celui des systèmes conventionnels dans le cas de taux de charge faible, ce qui est la condition plus réaliste. Dans (Wu and Yang, 2014), les auteurs étudient les performances de la récolte d'énergie d'un capteur sans fil alimenté par l'énergie dont l'origine est la radio fréquence provenant d'un système MIMO multiutilisateurs existant. Plus précisément, l'idée consiste en un schéma de sélection de faisceau pour améliorer la performance de récolte d'énergie au niveau du capteur. En effet, sous une contrainte de puissance de transmission totale constante, le système MIMO multiutilisateur essaie de sélectionner un nombre maximal de faisceaux actifs pour la transmission de données tout en satisfaisant à l'exigence de récolte d'énergie au niveau du capteur. Le travail de (Park et al., 2012) aborde le problème de maximisation du débit d'un système constitué de nœuds récolteurs d'énergie avec des débits de transmission adaptatifs transmettent à une destination. La technique consiste en une règle d'adaptation à taux discret. Cette adaptation à taux discret proposée a été traitée dans le cas d'un seul nœud et son optimalité pour une classe générale de processus de récolte d'énergie et d'évanouissement stationnaire et ergodique a été prouvée. Le système général avec plusieurs nœuds récolteurs d'énergie avec une sélection opportuniste est également étudié.

Lorsque les appareils sans fil sont équipés de plusieurs antennes, l'optimisation des performances des réseaux sans fil devrait tenir en compte la dimension de l'espace. En effet, les systèmes MIMO, sont en mesure d'améliorer l'efficacité spectrale et la diversité multiutilisateurs dans les deux sens montant et descendant (Telatar, 1999). Cependant, les avantages promis par les systèmes MIMO multiutilisateurs ne peuvent pas être complètement extraits dans un contexte multiutilisateur sans systèmes d'ordonnancement efficaces. En fait, un grand nombre d'algorithmes d'ordonnancement ont été rapportés dans la littérature (Ajib and Haccoun, 2005). Dans (Yoo and Goldsmith, 2006), un algorithme de sélection des utilisateurs dans un système MIMO multiutilisateurs pour augmenter le débit du « ZF-*beamforming* » sur la liaison descendante. La stratégie est basée sur la semi-orthogonalité des vecteurs des utilisateurs qui peuvent être actifs simultanément. Dans (Xue et al., 2007), une stratégie dynamique

de sélection des capteurs basée sur des algorithmes génétiques est proposée afin de parvenir à un compromis entre la consommation d'énergie et le taux de couverture énergétique efficace. Une plateforme analytique d'ordonnancement en temps et en espace pour un système MU-MIMO est développée par (Lau, 2004). La stratégie optimale proposée est basée sur la recherche d'ensembles discrets et utilise des techniques de programmation dynamique. Deux algorithmes heuristiques avec des performances asymptotiquement optimales sont proposés. Dans (Sigdel and Krzymien, 2007), deux algorithmes sous-optimaux sont également proposés pour réaliser un ordonnancement prenant en considération l'état des canaux sur le lien descendant dans un système MU-MIMO. Dans (Liang et al., 2011), les auteurs proposent deux algorithmes heuristiques pour réduire la complexité de la programmation multiutilisateur sur le lien montant.

Lorsque les dispositifs sans fil à antennes multiples en général et les capteurs en particulier sont équipés d'aptitudes de récolte d'énergie, l'optimisation des performances des RCSF avec récolte d'énergie devrait également tenir compte de la dimension énergétique émergeant de la récolte d'énergie en plus de la dimension de l'antenne (c.-à-d., la dimension de l'espace).

En outre, seuls quelques travaux ont examiné les deux dimensions de l'énergie et de l'espace pour optimiser les performances du système. Dans (Lee and Liu, 2015), un système point à point disposant de plusieurs relais intermédiaires entre l'émetteur et le récepteur dotés de la technique de la récolte d'énergie avec une source et une destination a été étudié. Les auteurs montrent que la diversité complète des relais n'est atteinte que lorsqu'on considère à la fois l'état du canal et celui de la batterie. La même conclusion a été tirée dans (Medepally, 2010) où les auteurs montrent que la dimension de l'énergie joue un rôle important dans la prise des décisions pour la sélection de relais dans les systèmes multi-relais récolteurs d'énergie.

2.5.2 L'équité dans les réseaux

La croissance exponentielle de la technologie sans fil à son tour fait augmenter le nombre des appareils présents dans les réseaux. Ceci a introduit des défis supplémentaires quant à l'allocation des ressources qui sont généralement rares (SHI et al., 2014). Dans ce contexte, l'équité est un critère de performance très important dans les réseaux en général (Raj et al., 1998). Cette question d'équité peut être analysée à partir de plusieurs dimensions comme la consommation d'énergie, la réalisation de la qualité de service requise, le partage du spectre, l'accès au canal et ainsi de suite.

D'après (SHI et al., 2014), il est assez difficile de se mettre d'accord sur une définition universelle de l'équité car elle est subjective. Mais, indépendamment de la définition que prend l'équité, elle est considérée comme un critère très important qui ne doit pas être

négligé dans les réseaux sans fil en général.

Si on prend par exemple un scénario d'un réseau de capteurs sans fil où les récepteurs détectent des informations dans leur entourage et les envoient vers la station de base comme le montre la figure 2.8. L'objectif de la station de base est de sélectionner le plus grand nombre de nœuds pour transmettre leurs échantillons sans dépasser le nombre d'antennes dont elle dispose. Si on suppose que les nœuds N_1 et N_2 sont proche de la station de base alors que N_3 est loin et on utilise un algorithme classique de sélection des nœuds, N_1 et N_2 seront souvent choisis tandis que N_3 le sera très rarement. Par conséquent, trouver un algorithme équitable pour la sélection des nœuds s'avère nécessaire.

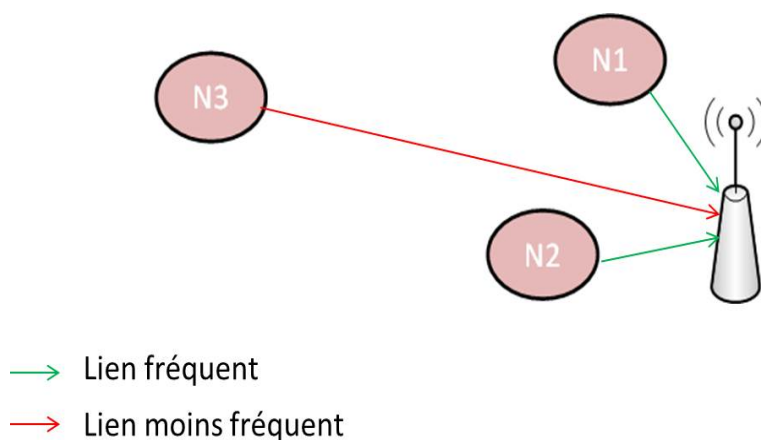


Figure 2.8 Exemple où l'équité entre les nœuds est importante

Pour cette raison, de nombreux travaux ont été élaborés en ce sens. Certains prennent en considération l'équité dans leurs travaux explicitement en les incluant dans l'une des contraintes du problème traité. Alors que d'autres la prennent implicitement comme le cas par exemple de (Goonewardena et al., 2015) où l'objectif était de maximiser le débit de données pour un système MIMO multiutilisateurs où tous les émetteurs sont capables de récolter l'énergie, sous des contraintes de stabilisation des files d'attente où l'énergie est stockée. Un équilibrage au niveau des états des batteries a été utilisé pour assurer indirectement l'équité entre les différents nœuds du réseau.

Dans (Marasevic et al., 2014), les auteurs utilisent une maximisation lexicographique des débits assignés aux nœuds du réseau qui permet à son tour d'avoir de bonnes performances en terme d'équité max-min. L'équité touchent les nœuds ainsi que leur allocation des intervalles de temps. Dans (Raghuvir et al., 2013), les auteurs adaptent l'allocation des débits de transmission équitablement dans le contexte des nœuds dotés de capacités de récolte d'énergie. Ils utilisent des mesures d'équité instantanées pour mettre à jour le nombre de nœuds

qui pourront accéder au canal de transmission. Dans (Meng et al., 2009), une adaptation de la maximisation du débit proportionnellement équitable est apportée dans un contexte radio-cognitif.

2.6 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil, les systèmes à antennes multiples ainsi que la technologie de la récolte d'énergie ont été particulièrement considérés dans ce chapitre. En outre, une revue de littérature en termes d'ordonnancement et d'équité a été présentée.

CHAPITRE 3 MODÈLE DE SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME

3.1 Introduction

Étant donné le nombre limité des travaux de recherche qui combinent le problème de sélection des nœuds avec la récolte d'énergie dans la littérature particulièrement pour les technologies MU-MIMO, on s'intéresse dans ce travail à un problème de sélection des nœuds sujet à des contraintes de qualité de service et prenant en compte des exigences de la récolte d'énergie. Ce chapitre discute d'abord du modèle du système adopté dans ce travail. Ensuite, il présente la formulation du problème ainsi qu'une preuve de sa **NP**-difficulté. Finalement, il présente une borne supérieure sur le nombre de capteurs sélectionnés.

3.2 Modèle du système

Dans ce mémoire, on considère un RCSF composé de K capteurs sans fil récolteurs d'énergie, distribués aléatoirement dans une zone géographique et communiquant avec un collecteur de données ordinaire (c.-à-d., alimenté de manière traditionnelle) et équipé de N antennes à la réception tel que $K \geq N$. En se basant sur les travaux présentés dans, (Yoo and Goldsmith, 2006), (Lim et al., 2006) et (Meng et al., 2009), on suppose que le collecteur de données décode les données reçues en utilisant un récepteur ZF.

La distance qui sépare un capteur k et le collecteur de données est dénotée d_k . Le modèle du système est illustré par la figure 3.1. Entre chaque capteur et le récepteur, le vecteur canal est de taille $N \times 1$ et inclut un évanouissement de Rayleigh et une atténuation qui s'écrit selon la formule suivante :

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{l}_k \sqrt{\left(\frac{d_0}{d_k}\right)^\beta},$$

où β représente l'exposant d'atténuation, d_0 est la distance de référence et \mathbf{l}_k représente l'évanouissement à petite échelle formulé par un vecteur de variables aléatoires gaussiennes avec une moyenne nulle et une variance égale à l'unité.

Le signal reçu par le collecteur de données peut être écrit de la manière suivante ;

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w},$$

où $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ est le vecteur des symboles envoyés par les capteurs, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_K]$ tel que $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ est la matrice de canaux entre les capteurs et les différentes antennes du récepteur et $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ représente le bruit gaussien additif ayant une covariance $N_0 \mathbf{I}$ où \mathbf{I} représente la matrice identité. Les entrées de la matrice \mathbf{H} sont supposées être indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d).

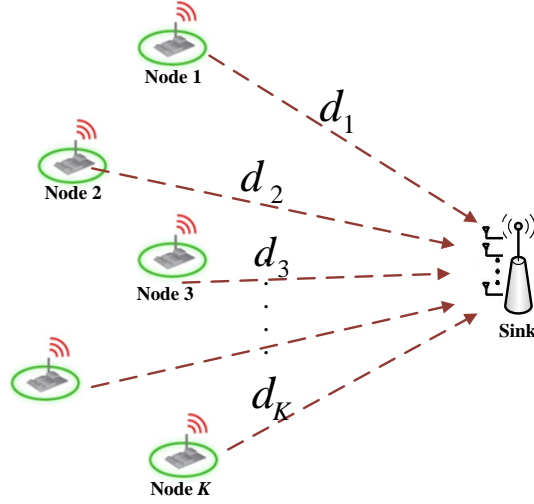


Figure 3.1 Modèle du système

Le système fonctionne en intervalles de temps dont chacun est divisé en deux phases. Pendant la première partie de l'intervalle de temps, un sous-ensemble \mathcal{C}_0 de K capteurs est sélectionné pour recueillir des informations et générer les bits correspondants. Ensuite, les bits sont transmis pendant la deuxième phase.

Pour des raisons de simplicité, la capacité de stockage d'énergie maximale E_{max} de chaque nœud est supposée être infinie, alors que le cas plus général de stockage fini est laissé pour les travaux futurs. Le capteur récolte une quantité A_k d'énergie. et consomme deux quantités à savoir une énergie pour la détection dénotée par s_k et une énergie pour la transmission dénotée par e_k . L'énergie disponible dans sa batterie est dénotée par E_k . Par conséquent, la relation entre deux intervalle de temps sur le plan d'énergie est exprimée comme suit :

$$E_k(t+1) = E_k(t) - (e_k(t) + s_k(t)) + A_k(t)$$

La figure 3.2 illustre la dynamique de la batterie pour une capteur k récolteur d'énergie.

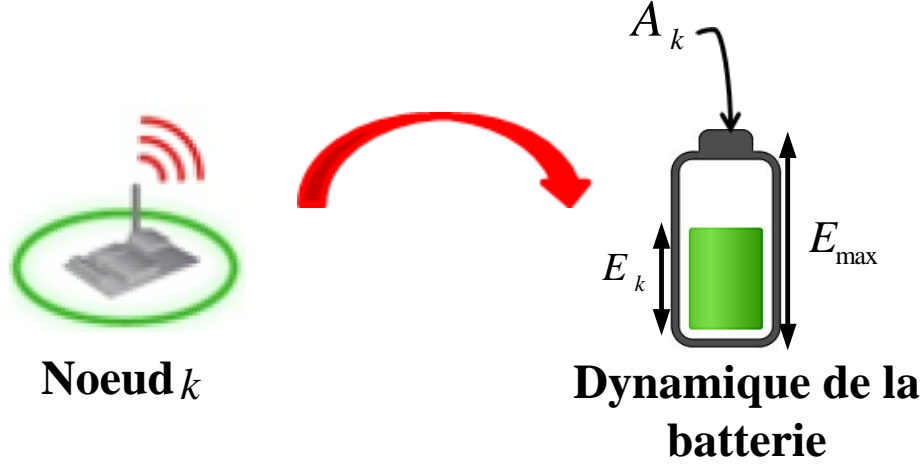


Figure 3.2 Modèle de la récolte d'énergie

Dans le travail proposé, les gains du canal restent inchangés pendant le même intervalle de temps mais varient indépendamment d'un intervalle de temps à un autre.

À chaque intervalle de temps, le nombre de bits de données générés par chaque capteur k est supposé avoir la même valeur fixe donnée par $B(t) = \gamma_k s_k(t)$ pour chaque nœud où γ_k et $s_k(t)$ représentent respectivement l'efficacité de la détection et l'énergie consommée par le capteur k pour la détection.

Dans le modèle proposé dans ce travail, on suppose qu'un nœud ne peut être sélectionné que s'il possède suffisamment d'énergie disponible au début de l'intervalle de temps pour détecter et transmettre $B(t)$ bits de données.

Le processus d'arrivée de l'énergie est supposé être un processus de Bernoulli avec une moyenne de λ (Yang, 2014). L'énergie est accumulée d'un intervalle de temps à un autre à chaque nœud. La quantité d'énergie récoltée pendant l'intervalle de temps t peut être utilisée pendant l'intervalle de temps $t + 1$.

En raison du nombre limité d'antennes à la réception imposé par l'existence de la pseudo-inverse de la matrice du canal utilisé par le récepteur ZF (voir la section 2.4.2), le collecteur de données sélectionne un sous-ensemble de capteurs \mathcal{C}_0 tel que $|\mathcal{C}_0|$ ne dépasse pas le nombre d'antennes N à la réception où $|\cdot|$ désigne le cardinal d'un ensemble. La stratégie de sélection des nœuds combine à la fois l'état de la batterie et l'état de canal de chaque capteur. Pour plus de commodité, nous résumons les principales notations utilisées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Notations

Notation	Description
$E_k(t)$	l'énergie restante dans la batterie du nœud k pendant l'intervalle de temps t
$A_k(t)$	quantité d'énergie récoltée par le capteur k pendant l'intervalle de temps t
$e_k(t)$	l'énergie allouée pour la transmission de données par le capteur k pendant l'intervalle de temps t
$s_k(t)$	l'énergie allouée pour la détection par le capteur k pendant l'intervalle de temps t
E_{max}	capacité maximale de la batterie d'énergie du capteur
γ_k	l'efficacité de détection au niveau du capteur k
N	Nombre d'antennes de réception chez le collecteur des données
K	Nombre de capteurs présents dans le réseau
\mathcal{C}_0	ensemble de capteurs sélectionnés à l'intervalle de temps t
η	seuil de SNR
$B(t)$	nombre de bits générés par un capteur pendant l'intervalle de temps t
F	fenêtre temporelle
N_k	nombre de fois le capteur k est sélectionné pendant la fenêtre F
β	exposant d'atténuation

3.3 Formulation du problème

Cette section introduit la formulation du problème de sélection des nœuds. L'objectif principal est de maximiser le nombre de nœuds de capteurs sélectionnés soumis à une contrainte de rapport signal sur bruit (SNR) requis au récepteur, la disponibilité de l'énergie aux nœuds et le nombre limité d'antennes au niveau du récepteur.

Le problème d'optimisation a une nature combinatoire et il est formulé comme suit :

$$\text{Maximiser } \sum_{k=1}^K x_k(t) \quad (3.0)$$

sous contraintes

$$\sum_{k=1}^K x_k(t) \leq N \quad (3.1)$$

$$x_k(t) \cdot (e_k(t) + s_k(t)) \leq E_k(t), \forall k \quad (3.2)$$

$$SNR_{k,t}(\mathbf{x}(t)) \geq \eta, \forall k \quad (3.3)$$

$$E_k(t+1) = E_k(t) - (e_k(t) + s_k(t)) \cdot x_k(t) + A_k(t), \forall k \quad (3.4)$$

$$x_k(t) \in \{0, 1\}, \forall k \quad (3.5)$$

où :

$$x_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{si le capteur } k \text{ est sélectionné} \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

$E_k(t)$ est la quantité d'énergie disponible au niveau du capteur k , η est le seuil minimal de SNR requis au récepteur pour recevoir correctement les données, $e_k(t)$ représente la quantité d'énergie allouée pour la transmission de données par le capteur k et $\mathbf{x}(\mathbf{t}) = [x_1(t), \dots, x_K(t)]$ est le vecteur composé par les différentes variables binaires du problème indiquant les nœuds sélectionnés. La quantité d'énergie récoltée par le capteur k pendant l'intervalle de temps t est égale à $A_k(t)$.

La contrainte (3.1) assure que le nombre de capteurs sélectionnés ne dépasse pas le nombre d'antennes à la réception. Les contraintes (3.2) signifient que les nœuds sélectionnés doivent disposer d'une quantité d'énergie suffisante pour effectuer à la fois la détection et les tâches de transmission. Les contraintes (3.3) représentent la qualité de service requise qui est dans ce cas une mesure minimale de SNR à satisfaire par chacun des capteurs sélectionnés. Puisque nous avons un récepteur ZF, le SNR effectif pour le nœud k est donné par la formule suivante (Paulraj et al., 2003) :

$$SNR_{k,t}(\mathbf{x}(\mathbf{t})) = \frac{e_k(t)/N_0B(t)}{[(\mathbf{H}(\mathbf{x}(\mathbf{t}))^*\mathbf{H}(\mathbf{x}(\mathbf{t})))^{-1}]_{k,k}} \quad (3.6)$$

où \mathbf{H}^* représente la trans-conjuguée de la matrice \mathbf{H} , $[\mathbf{X}]_{k,k}$ représente le i ème élément diagonal de la matrice \mathbf{X} et $\mathbf{H}(\mathbf{x}(\mathbf{t}))$ désigne la matrice formée par les indices k correspondant aux $x_k(t)$ choisis pour transmettre simultanément pendant l'intervalle de temps t (c.-à-d., $k \in \{i, x_i(t) = 1\}$). En d'autres termes, les dimensions de la matrice $\mathbf{H}(\mathbf{x}(\mathbf{t}))$ dépendent étroitement des capteurs sélectionnés. Finalement, les contraintes (3.4) illustrent la mise à jour de l'état de la batterie effectuée à la fin de chaque intervalle de temps.

Le problème proposé est un problème d'une complexité colossale. Dans ce qui suit, une preuve de sa **NP**-difficulté est fournie.

3.4 NP-Difficulté

Dans la littérature, les problèmes de sélection des nœuds et des utilisateurs ont été qualifiés de très complexes (Yoo and Goldsmith, 2006) mais aucune preuve de **NP**-difficulté n'a été élaborée. Dans cette section, on va démontrer la **NP**-difficulté du problème de sélection des nœuds du présent travail.

Théorème 1 :

Le problème de sélection des nœuds (3.2) sous des contraintes de SNR est **NP**-difficile.

Preuve :

L'idée de cette preuve consiste à montrer que le problème de sélection des nœuds considéré dans ce travail contient un sous problème **NP**-difficile. Au début, nous allons faire une restriction sur le problème général de sélection des nœuds pour construire un sous problème de décision (Garey and Johnson, 1979). Ce sous problème est obtenu en fixant certains paramètres du grand problème de sélection des nœuds (c.-à-d., le sous problème correspond à un cas particulier du problème de sélection original).

Ensuite, nous allons montrer qu'une instance du problème « Max-Min Singular Value » prouvé comme **NP**-difficile dans (Çivril and Magdon-Ismail, 2009) est vraie si et seulement si le sous problème de décision correspondant au sous problème de sélection des nœuds est vraie.

Sur la base de ces informations, nous allons considérer le cas particulier du problème de sélection des nœuds comme suit :

Supposons que $\frac{e_k}{B(t)} = e, \forall k \in \{1 \dots K\}$ avec e une constante. Si l'énergie est fixée, le défi du problème de sélection reste à vérifier la contrainte de SNR pour chaque capteur. Cette contrainte rend la complexité de la sélection exorbitante.

La maximisation du nombre de nœuds revient à extraire le plus grand nombre de vecteurs \mathbf{h}_k de la matrice des canaux de telle sorte que le SNR correspondant soit toujours dans les normes fixées par le problème.

Dans ce sens, le problème revient à trouver une sous matrice de la matrice des canaux \mathbf{H} tel que $SNR_{k,t}(\mathbf{x}(t)) \geq \eta, \forall k$. En réarrangeant les termes de droite et de gauche de la contrainte 3.3, la nouvelle contrainte s'écrit comme suit :

$$\frac{e}{N_0[(\mathbf{H}(\mathbf{x}(t))^* \mathbf{H}(\mathbf{x}(t)))^{-1}]_{k,k}} = \frac{e}{N_0[(\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1}]_{k,k}} \geq \eta, \forall k \in \{1 \dots K\}, \quad (3.7)$$

où \mathbf{C} est une sous matrice de la matrice \mathbf{H} . Elle est obtenue en éliminant des colonnes de la matrice \mathbf{H} . Pour montrer la **NP**-difficulté de ce problème, nous allons considérer une réduction du problème « Max-Min Singular Value » connu pour être **NP**-difficile dans (Çivril and Magdon-Ismail, 2009).

Problème de Max-Min Singular Value :

– Instance :

Une matrice \mathbf{A} ayant au moins un rang p et un réel $M \in \mathbb{R}$ (\mathbb{R} représente l'ensemble des réels).

– Question :

Est ce qu'il existe une sous matrice $\mathbf{C} \in \mathcal{M}_{N \times p}$ de la matrice \mathbf{A} tel que $\sigma_p(\mathbf{C}) \geq M$ avec $\sigma_p(\mathbf{C})$ est la petite valeur singulière de la sous matrice \mathbf{C} ?

où $\mathcal{M}_{a \times b}$ représente l'ensemble des matrices possédant a lignes et b colonnes.

Nous allons utiliser la réduction suivante du problème précité : Supposons que notre matrice des canaux \mathbf{H} est la matrice \mathbf{A} . Le réel M sera égal à $\sqrt{\frac{NN_0\eta}{e}}$ et vérifie la condition $\sigma_p(\mathbf{H}) \geq M$. Cette réduction sera utilisée comme une instance du problème « Max-Min Singular Value » dans la suite de la preuve. Certes, il est clair que cette réduction peut être réalisée en un temps polynomial. En effet, pour construire adéquatement cette instance du problème, nous avons besoin d'une complexité de l'ordre de $O(KN^2)$ (Charles et al., 1983) afin de faire la décomposition de la matrice \mathbf{H} en valeurs singulières.

Tout ce qui reste maintenant est de montrer que l'instance du problème « Max-Min Singular Value » est vraie si et seulement si l'instance correspondante du problème de sélection de nœud est vraie.

Sous problème de sélection des nœuds :

– Instance :

\mathbf{A} une matrice tel que $\mathbf{A} \in \mathcal{M}_{N \times K}$ et de rang au moins p , les paramètres du problème N, N_0, η et e pour cette instance sont choisis tels que : $\sigma_1(\mathbf{A}) \geq \sigma_2(\mathbf{A}) \cdots \geq \sigma_p(\mathbf{A}) \geq M$, où $M = \sqrt{\frac{NN_0\eta}{e}}$.

– Question : Existe-t-il une sous matrice $\mathbf{C} \in \mathcal{M}_{N \times p}$, tel que $\frac{e}{N_0[(\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1}]_{k,k}} \geq \eta, \forall k \in \{1 \dots p\}$?

Nous commençons par expliciter la valeur de $[(\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1}]_{k,k}$: $\mathbf{C} \in \mathcal{M}_{N \times p} \Rightarrow \exists \mathbf{W}, \mathbf{V}$ and $\mathbf{\Sigma}$ trois matrices telles que $\mathbf{C} = \mathbf{V} \mathbf{\Sigma} \mathbf{W}^*$. Les matrices $\mathbf{V} \in \mathcal{M}_{N \times N}$ et $\mathbf{W} \in \mathcal{M}_{p \times p}$ sont deux matrices unitaires et $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1(\mathbf{C}), \sigma_2(\mathbf{C}), \dots, \sigma_p(\mathbf{C}))$ avec $\sigma_1(\mathbf{C}), \sigma_2(\mathbf{C}), \dots, \sigma_p(\mathbf{C})$ sont les valeurs singulières de la matrice \mathbf{C} et $\text{diag}(a, \dots, z)$ représente une matrice carrée dont les éléments de la diagonale principale sont (a, \dots, z) et les autres éléments sont nuls .

D'après (Charles et al., 1983), sans perte de généralité, on considère que :

$$\sigma_1(\mathbf{C}) \geq \sigma_2(\mathbf{C}) \geq \cdots \geq \sigma_p(\mathbf{C}).$$

Soit $\{e_{i,j}\}_{i,j \in \{1 \dots p\}}$ et $\{w_{i,j}\}_{i,j \in \{1 \dots p\}}$ les éléments des matrices $(\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1}$ et \mathbf{W} , respectivement (c.-à-d., $(\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1} = \{e_{i,j}\}_{i,j \in \{1 \dots p\}}$ et $\mathbf{W} = \{w_{i,j}\}_{i,j \in \{1 \dots p\}}$).

En utilisant le fait que la matrice \mathbf{W} est unitaire (c.-à-d., $\mathbf{W} \mathbf{W}^* = \mathbf{I}_{\mathbf{p} \times \mathbf{p}}$ où $\mathbf{I}_{\mathbf{p} \times \mathbf{p}}$ représente la matrice unité de taille $(p \times p)$), on obtient l'expression suivante :

$$e_{i,i} = \sum_{k=1}^p \frac{|w_{i,k}|^2}{\sigma_k^2(\mathbf{C})}, \forall i \in \{1 \dots p\}.$$

Supposons que l'instance du problème « Max-Min Singular value » est vraie, alors il existe une matrice $\mathbf{C} \in \mathcal{M}_{N \times p}$ tel que $\sigma_p(\mathbf{C}) \geq M = \sqrt{\frac{N N_0 \eta}{e}}$.

Puisque les valeurs singulières sont toutes positives, nous avons : $\frac{N}{\sigma_p^2(\mathbf{C})} \leq \frac{e}{N_0 \eta}$, $\forall i \in \{1 \dots p\}$. Or, $|w_{i,k}|^2 \leq 1$ et $p \leq N$. Par conséquent, on trouve :

$$\sum_{k=1}^p \frac{|w_{i,k}|^2}{\sigma_k^2(\mathbf{C})} \leq \frac{p}{\sigma_p^2(\mathbf{C})} \leq \frac{N}{\sigma_p^2(\mathbf{C})} \leq \frac{e}{N_0 \eta}, \forall i \in \{1 \dots p\}.$$

Donc, l'instance du sous problème de sélection des nœuds est vérifiée.

Maintenant, supposons que l'instance du problème de la sélection des nœuds est vraie, nous avons par construction de l'instance que $\sigma_p(\mathbf{A}) \geq M$. Aussi, d'après (Lim et al., 2006) : $\sigma_1(\mathbf{A}) \geq \sigma_1(\mathbf{C}) \geq \sigma_2(\mathbf{A}) \geq \sigma_2(\mathbf{C}) \dots \geq \sigma_p(\mathbf{C}) \geq \sigma_p(\mathbf{A})$. Donc, on obtient que $\sigma_1(\mathbf{A}) \geq \sigma_1(\mathbf{C}) \geq \sigma_2(\mathbf{A}) \geq \sigma_2(\mathbf{C}) \dots \geq \sigma_p(\mathbf{C}) \geq \sigma_p(\mathbf{A}) \geq M \Rightarrow \sigma_p(\mathbf{C}) \geq M$. Cela signifie que l'instance du problème « Max-Min Singular Value » est vraie.

Par conséquent, nous avons montré la correspondance entre les deux problèmes et donc la **NP**-difficulté du problème.

3.5 Borne supérieure

Dans cette section on va expliciter une borne supérieure sur le nombre de nœuds pendant un intervalle de temps t .

Lemme 1 :

Le nombre de capteurs sélectionnés pendant un intervalle de temps ne peut pas excéder la quantité formulée comme suit :

$$|C_0| = \sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K x_k(l) \leq \sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K A_j(l) \quad (3.8)$$

Preuve :

Etant donné qu'un capteur consomme au moins une unité d'énergie pour effectuer la détection et la transmission des bits générés (c.-à-d., $s_k(t) + e_k(t) \geq 1$) et le processus d'énergie est un processus de Bernoulli (c.-à-d., le capteur peut avoir 0 ou 1 unités d'énergie pendant un intervalle de temps t), le nombre de capteurs pendant un intervalle de temps ne peut pas excéder la quantité présentée comme ci-dessous :

$$\sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K x_k(l) \leq \sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K x_k(l)(s_j(l) + e_j(l)) \leq \sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K E_j(l) \leq \sum_{l=0}^{t-1} \sum_{j=1}^K A_j(l) \quad (3.9)$$

3.6 Conclusion

Ce chapitre présente le modèle du système ainsi que la formulation du problème traité dans ce mémoire. Une preuve de la **NP**-difficulté du problème ainsi qu'une borne supérieure sur le nombre de nœuds sélectionnés au fil de temps ont été présentées. Le chapitre suivant présentera les différents algorithmes proposés pour résoudre ce problème.

CHAPITRE 4 ALGORITHMES PROPOSÉS

4.1 Introduction

Afin de résoudre efficacement le problème décrit dans le chapitre 3, on propose deux algorithmes heuristiques dans ce chapitre. Une solution adaptative qui choisit l'algorithme fournissant le meilleur nombre de nœuds sélectionnés à chaque intervalle de temps est également présentée. Les performances de ces algorithmes sont comparées à l'algorithme optimal par recherche exhaustive et un autre qui utilise une approche de sélection aléatoire dans le chapitre suivant. Ce chapitre fournit une description détaillée de tous les algorithmes précités.

4.2 L'algorithme optimal par recherche exhaustive

Les techniques algorithmiques qu'on peut utiliser pour obtenir la solution optimale d'un problème d'optimisation donné sont nombreuses. Évidemment, ces techniques diffèrent principalement au niveau de leur logique de conception et par leur complexité. Parmi ces techniques, on cite l'exemple de la recherche exhaustive qui sert à résoudre des problèmes analogues à celui décrit dans le chapitre 3. En effet, l'algorithme basé sur la recherche exhaustive est très simple en termes de conception. Il consiste simplement à générer toutes les combinaisons possibles et choisir ensuite la combinaison qui donne la meilleure solution. Le fonctionnement de l'algorithme optimal basé sur la recherche exhaustive est résumé dans Algorithme 1. Les différentes étapes de cet algorithme dénoté O-NSA (Optimal Node Selection Algorithm) se résument comme suit :

1. Génération des combinaisons : la première étape consiste à générer tous les M -uplets à partir de l'ensemble des capteurs présents dans le réseau et les sauvegarder dans une matrice **COMB**.
2. Après, il parcourt la matrice **COMB** ligne par ligne et calcule les valeurs des SNR et vérifie la disponibilité d'énergie pour chaque capteur appartenant à chaque combinaison.
3. Chaque capteur qui ne vérifie pas l'une ou les deux contraintes du problème sera effacé de la matrice **COMB**.
4. Si **COMB** n'est pas vide, l'algorithme choisit la combinaison qui consomme le moins d'énergie en moyenne. Sinon, étant donné qu'aucune sélection à M -uplets n'est possible, la valeur de M sera décrémentée de 1 dans la prochaine itération.
5. Finalement, l'algorithme retourne la combinaison de nœuds choisie et met à jour les batteries d'énergie des nœuds.

Algorithme 1 Pseudo-code de l'algorithme O-NSA

Entrée : E_k pour chaque capteur k

Initialisation :

$\mathcal{S}_1 \leftarrow \{1 \dots K\},$

$j \leftarrow 1,$

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \emptyset,$

$\mathbf{g}_k \leftarrow \mathbf{h}_k, \forall k \in \{1 \dots K\},$

$M = N$

Étapes :

- 1: Générer toutes les combinaisons possibles à N nœuds, soit une matrice **COMB**.
- 2: Évaluer les contraintes pour chaque combinaison dans **COMB**.
- 3: Éliminer de la matrice **COMB** la combinaison qui ne satisfait pas les contraintes.

si **COMB** $\neq \emptyset$ **alors**

| Choisir une combinaison dans **COMB** qui consomme moins d'énergie en moyenne

sinon

| $M \leftarrow M - 1$

pour $k \leftarrow 1$ **à** K **faire**

| $E_k \leftarrow E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) + A_k$

Sortie : E_k pour chaque capteur k et \mathcal{C}_0

4.11 L'algorithme par sélection aléatoire

Une des techniques avec laquelle le collecteur des données peut assurer la sélection des nœuds est une technique qui ne nécessite aucune intelligence logicielle. L'approche utilisée dans cette technique consiste à tirer aléatoirement un capteur à chaque itération de l'algorithme du réseau et évaluer les contraintes fixées par le problème. Le tirage effectué est sans remise. Par conséquent, si ce capteur tiré vérifie les conditions, il sera mis dans l'ensemble des nœuds sélectionnés pour cet intervalle de temps. Sinon, il sera éliminé de l'ensemble de recherche. La sélection aléatoire se poursuit pour tout l'ensemble. Le fonctionnement de cet algorithme noté R-NSA (Random Node Selection Algorithm) est donné par Algorithme 2.

Algorithm 2 Pseudo-code de l'algorithme R-NSA

Entrée : E_k pour chaque capteur k
Initialisation :
 $\mathcal{S}_1 \leftarrow \{1 \dots K\},$
 $j \leftarrow 1,$
 $\mathcal{C}_0 \leftarrow \emptyset,$
 $\mathbf{g}_k \leftarrow \mathbf{h}_k, \forall k \in \{1 \dots K\},$
 $M = N$
tant que $\mathcal{S}_j \neq \emptyset$ **faire**
 Tirer aléatoirement un capteur $k \in \{1 \dots K\}$
 Évaluer les contraintes (3.2) et (3.3) pour ce capteur k
 si *les contraintes sont vérifiées* **alors**
 $\mathcal{C}_0 \leftarrow \mathcal{C}_0 \cup k$
 $\mathcal{S}_j \leftarrow \mathcal{S}_j \setminus k$
 sinon
 $\mathcal{S}_j \leftarrow \mathcal{S}_j \setminus k$
 $j = j + 1$
pour $k \leftarrow 1$ **à** K **faire**
 $E_k \leftarrow E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) + A_k$
Sortie : E_k pour chaque capteur k et \mathcal{C}_0

4.12 Algorithmes heuristiques proposés

Comme on l'a démontré dans la section (3.4), le problème de sélection des nœuds considéré est **NP**-difficile. Par conséquent, déterminer la solution optimale requiert une recherche exhaustive parmi toutes les combinaisons possibles des nœuds. Dans ce cas, la complexité résultante sera égale à $\sum_{i=1}^N \binom{K}{i}$ qui est une complexité énorme surtout lorsque on travaille à grande échelle (c.-à-d., K est très élevée). À ces fins, utiliser une technique à faible complexité qui assure une bonne performance s'avère très utile en pratique surtout dans le cas d'un grand K . Le premier algorithme est basé sur le principe de semi-orthogonalité entre les nœuds et est dénoté SO-NSA (Semi-Orthogonal Node Selection Algorithm) et le deuxième utilise une approche conservatrice d'énergie et est dénoté LCE-NSA (Less Consumed Energy Node Selection Algorithm). Les algorithmes fonctionnent à chaque intervalle de temps afin de fournir l'ensemble des nœuds sélectionnés en se basant sur les informations présentées chez le collecteur des données instantanément.

4.12.1 L'algorithme SO-NSA

Algorithme 3 Pseudo-code de l'algorithme SO-NSA

Entrée : E_k pour chaque capteur k

Initialisation :

$\mathcal{S}_1 \leftarrow \{1 \dots K\},$

$j \leftarrow 1,$

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \emptyset,$

$\mathbf{g}_k \leftarrow \mathbf{h}_k, \forall k \in \{1 \dots K\}$

tant que $(|\mathcal{C}_0| < N) \wedge (\mathcal{S}_j \neq \emptyset)$ **faire**

$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier}\{\{\|\mathbf{g}_k\| E_k\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j\}$

 /* la fonction trier $\{A, B\}$ retourne la copie triée de B selon le critère

 A */

pour $k \in \mathcal{L}$ **faire**

si $(\text{SNR}_k(k \cup \mathcal{C}_0) \geq \eta) \wedge ((e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) \leq E_k)$ **alors**

$\pi(j) \leftarrow k$

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \mathcal{C}_0 \cup \pi(j)$

$\mathbf{h}_{(j)} \leftarrow \mathbf{h}_{\pi(j)}$

$\mathbf{g}_{(j)} \leftarrow \mathbf{g}_{\pi(j)}$

 Sortir de la boucle

sinon

$\mathcal{S}_j \leftarrow \mathcal{S}_j \setminus \{k\}$

si $(|\mathcal{C}_0| < N) \wedge (\mathcal{S}_j \neq \emptyset)$ **alors**

$\mathcal{S}_{j+1} \leftarrow \{k \in \mathcal{S}_j, k \neq \pi(j), \frac{|\mathbf{g}_{(j)}^* \mathbf{h}_k|}{\|\mathbf{g}_k\| \|\mathbf{g}_{(j)}\|} \leq \alpha\}$

sinon

$j \leftarrow j + 1$

pour $k \in \mathcal{S}_j$ **faire**

$\mathbf{g}_k \leftarrow \mathbf{h}_k - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\mathbf{g}_{(i)}^* \mathbf{h}_k}{\|\mathbf{g}_{(i)}\|^2} \mathbf{g}_{(i)}$

pour $k \leftarrow 1$ **à** K **faire**

$E_k \leftarrow E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) + A_k$

Sortie : E_k pour chaque capteur k et \mathcal{C}_0

L'algorithme SO-NSA se base sur le principe de semi-orthogonalité entre les différents nœuds sélectionnés et qui satisfont les contraintes requises par le système. Le concept de la semi-orthogonalité entre utilisateurs est inspiré de (Yoo and Goldsmith, 2006) dans lequel il a été montré qu'une telle technique maximise les SNRs des utilisateurs choisis. Une petite analogie entre cette idée et le présent problème nous a intuitivement mené à supposer qu'une telle technique maximise à son tour le nombre des capteurs qui peuvent être choisis. Algorithme 3 décrit le pseudo-code de l'algorithme SO-NSA. La procédure utilisée dans cet algorithme est

de nature itérative. À chaque itération j , on effectue le tri des nœuds présents dans \mathcal{S}_j dans un ordre décroissant selon les valeurs de $\|\mathbf{g}_k\|E_k$ de chaque capteur $k \in \mathcal{S}_j$ où \mathbf{g}_k représente le vecteur résultant de la projection du vecteur canal \mathbf{h}_k du capteur k dans l'espace complémentaire orthogonal à la base engendrée par $\{\mathbf{g}_{(1)}, \dots, \mathbf{g}_{(j-1)}\}$. Par la suite, l'algorithme parcourt la version triée de \mathcal{S}_j pour choisir le premier nœud qui satisfait les contraintes du problème. Juste après, les canaux des nouveaux capteurs sélectionnés sont mis à jour dans $\mathbf{h}_{(j)}$ et le prochain vecteur $\mathbf{g}_{(j)}$ de la nouvelle base est calculé. Juste après, les capteurs qui ne sont pas α -orthogonaux aux nœuds déjà choisis dans les itérations précédentes sont éliminés de l'ensemble \mathcal{S}_{j+1} . Ensuite, pour chaque nœud on calcule le vecteur \mathbf{g}_k . Enfin, l'ensemble des nœuds restant est mis à jour.

4.12.2 L'algorithme LCE-NSA

Algorithme 4 Pseudo-code de l'algorithme LCE-NSA

Entrée : E_k for each sensor node k

Initialisation :

$\mathcal{S}_1 \leftarrow \{1 \dots K\},$

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \emptyset.$

tant que $(|\mathcal{C}_0| < N) \wedge (\mathcal{S}_j \neq \emptyset)$ **faire**

$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier}\{\{E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k)\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j\}$

/* la fonction trier{A,B} retourne la copie triée de B selon le critère A */

pour $k \in \mathcal{L}$ **faire**

si $(SNR_k(k \cup \mathcal{C}_0) \geq \eta) \wedge ((e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) \leq E_k)$ **alors**

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \mathcal{C}_0 \cup k$

$\mathcal{S}_j \leftarrow \mathcal{S}_j \setminus \{k\}$

Sortir de la boucle

sinon

$\mathcal{S}_j \leftarrow \mathcal{S}_j \setminus \{k\}$

pour $k \leftarrow 1$ à K **faire**

$E_k \leftarrow E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k) + A_k$

Sortie : E_k pour chaque capteur k et \mathcal{C}_0 .

LCE-NSA désigne l'algorithme heuristique à basse consommation d'énergie. L'idée de l'algorithme LCE-NSA est de sélectionner à chaque itération le capteur qui préserve le plus d'énergie dans sa batterie après avoir accompli les tâches de détection et de transmission. L'algorithme fonctionne comme suit. D'abord, il fait le tri des nœuds restant dans l'ensemble \mathcal{S}_j dans un ordre décroissant selon la valeur de $E_k - (e_k + s_k)$ pour chaque capteur. Ensuite, le

premier nœud dans l'ordre qui satisfait les contraintes fixées par le problème sera sélectionné. Ce nœud qui vient d'être sélectionné sera ajouté à l'ensemble \mathcal{C}_0 et l'ensemble des capteurs restant \mathcal{S}_j sera mis à jour. Le pseudo-code de LCE-NSA est donné dans Algorithme 4.

4.12.3 L'algorithme adaptatif

Algorithme 5 Pseudo-code de l'algorithme adaptatif A-NSA

Entrée : E_k pour chaque capteur k

Initialisation :

$\mathcal{S}_1 \leftarrow \{1 \dots K\},$

$j \leftarrow 1,$

$\mathcal{C}_0 \leftarrow \emptyset,$

$\mathbf{g}_k \leftarrow \mathbf{h}_k, \forall k \in \{1 \dots K\},$

$M = N$

Étapes :

1: Évaluer la solution fournie par SO-NSA, \mathcal{C}_{01}

2: Évaluer la solution fournie par LCE-NSA, \mathcal{C}_{02}

si $(|\mathcal{C}_{01}| = |\mathcal{C}_{02}|)$ **alors**

 | Choisir aléatoirement \mathcal{C}_0^* parmi $\{\mathcal{C}_{01}, \mathcal{C}_{02}\}$

sinon

 | Choisir **max** $\{\mathcal{C}_{01}, \mathcal{C}_{02}\}$

pour $k \leftarrow 1$ **à** K **faire**

 | $E_k \leftarrow E_k - (e_k(\mathcal{C}_0^*) + s_k) + A_k$

Sortie : E_k pour chaque capteur k et \mathcal{C}_0^*

Cet algorithme est une technique de sélection adaptative (appelée « Adaptive Node Selection Algorithm » (A-NSA)) qui retient à chaque intervalle de temps parmi les deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA celui qui offre le plus grand nombre de nœuds sélectionnés et en cas d'égalité, choisit au hasard une des deux techniques. D'abord, l'algorithme fait rouler les deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA. Par la suite, il compare le nombre de nœuds sélectionnés réalisé avec chacun ($|\mathcal{C}_{01}|$ pour SO-NSA et $|\mathcal{C}_{02}|$ pour LCE-NSA) puis il retient celui qui offre le plus grand nombre de capteurs représenté par $|\mathcal{C}_0^*|$. Finalement, la mise à jour des batteries est effectuée. Le pseudo-code de l'algorithme adaptatif est donné par Algorithme 5

4.13 Analyse de complexité

Dans cette section, une petite étude qui a pour objectif de discuter l'ordre de complexité des différents algorithmes proposés est présentée.

L'algorithme optimal par recherche exhaustive

La détermination de la solution optimale nécessite une recherche exhaustive sur toutes les combinaisons possibles de nœuds de capteurs comme l'illustre l'Algorithme 1. La complexité qui en résulte est égale à $\sum_{i=1}^N \binom{K}{i}$. Cela rend la mise en œuvre de cette technique peu pratique notamment pour les grands K . Ceci a accrue nos motivations pour établir les Algorithmes 3 et 4. Dans ce qui suit, une analyse de complexité des différents algorithmes proposés.

L'algorithme SO-NSA

On va commencer par l'étude de la complexité de SO-NSA. Le tri des nœuds qui font partie de l'ensemble S_j selon la méthode de tri fusion engendre une complexité égale à $|S_j| \log(|S_j|)$. À cette complexité s'ajoute celle de la multiplication matricielle qui découle du calcul subséquent du SNR pour chaque nœud de l'espace trié \mathcal{L} et qui est de l'ordre de $O(j^2 N)$. Cette multiplication est enchaînée par une inversion matricielle dont la complexité est de l'ordre de $O(j^3)$. Finalement, la dernière boucle possède une complexité linéaire à N (c.-à-d., $O(N)$).

Comme on itère à chaque fois sur $|S_j|$, la complexité totale sera donnée par la formule ci-dessous :

$$C_{SO-NSA} = \sum_{j=1}^N |S_j| ((\log(|S_j|) + O(j^2 N) + O(j^3) + O(N))).$$

L'algorithme LCE-NSA

Maintenant pour LCE-NSA, on commence par ordonner les capteurs en utilisant le tri fusion similairement à ce qu'on fait dans l'algorithme SO-NSA, et donc on a une complexité de $|S_j| \log(|S_j|)$. Ce tri est suivi par le calcul de SNR pour chaque capteur dans le nouveau ensemble trié \mathcal{L} induisant une complexité de l'ordre $O(j^2 N) + O(j^3 + O(N))$. En tenant compte du nombre de nœuds $|S_j|$ sur lequel on itère à chaque étape de l'algorithme, la complexité résultante pour LCE-NSA est fournie par la formule suivante :

$$C_{LCE-NSA} = \sum_{j=1}^N |S_j| ((\log(|S_j|) + O(j^2 N) + O(j^3))).$$

L'algorithme A-NSA

La complexité de l'algorithme A-NSA est égale à la somme des complexités des algorithmes SO-NSA et LCE-NSA.

$$C_{A-NSA} = C_{SO-NSA} + C_{LCE-NSA}.$$

La complexité du pire cas pour les algorithmes SO-NSA et LCE-NSA est asymptotiquement la même et elle est égale à la formule suivante :

$$C_{SO-NSA} \approx C_{LCE-NSA} \approx O((K - N + 1)N^3) \quad (4.1)$$

Ceci ne représente qu'une borne supérieure qui n'est réellement pas atteinte en pratique car le nombre d'éléments de \mathcal{S}_j est largement inférieur au nombre total du capteurs K présents dans le réseau.

4.14 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents algorithmes proposés ainsi que deux autres utilisés pour comparer leurs performances dans un chapitre ultérieur. La complexité des deux algorithmes heuristiques est également étudiée.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS et DISCUSSIONS

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats numériques des algorithmes développés SO-NSA et LCE-NSA ainsi que leur efficacité et leurs performances.

5.2 Paramètres des simulations

Les résultats présentés ci-après sont acceptés pour présentation à "*IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016*" (Hentati et al., 2016).

L'environnement de programmation utilisé afin de réaliser les simulations est MATLAB (MATLAB, 2013). Pour les résultats présentés dans ce chapitre, on considère un réseau de capteurs sans fil composé de $K = 10$ capteurs et un collecteur de données équipé de $N = 6$ antennes de réception. Les capteurs sont répartis d'une manière aléatoire selon une distribution uniforme dans la zone géographique autour du collecteur de données dans un rayon de 20 mètres. L'exposant de l'atténuation du trajet β est égal à 4 et la distance de référence d_0 est égale à 10. Sans perte de généralité, les simulations supposent la même valeur d'efficacité de détection pour tous les capteurs. Elle est égale à $\gamma_k = 0,08\text{Mbits/J } \forall k \in \{1 \dots K\}$. En outre, une unité d'énergie est supposée nécessaire pour exécuter la tâche de détection. Le paramètre α qui est utilisé dans l'algorithme SO-NSA est égal à 0.4 (Yoo and Goldsmith, 2006) et N_0 est égal à 1. Les résultats sont obtenus pour tous les nœuds en utilisant 1000 simulations de Monte-Carlo. À chaque itération, 1000 réalisations de canaux indépendantes sont générées.

5.3 Résultats des simulations

Au cours des simulations, on a bien vérifié que le nombre de nœuds sélectionnés est toujours inférieur à la borne supérieure définie dans la section 3.5. Afin de comparer les performances des différents algorithmes, les résultats sont obtenus en variant la moyenne d'énergie λ et le seuil de SNR requis à la réception η .

La figure 5.1 montre l'impact de la moyenne d'arrivée d'énergie sur les performances des algorithmes en terme de nombre de nœuds sélectionnés. En plus des deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA, la figure 5.1 compare les performances des algorithmes proposés avec l'algorithme basique de la sélection aléatoire (appelé Random Node Selection Algorithm (R-

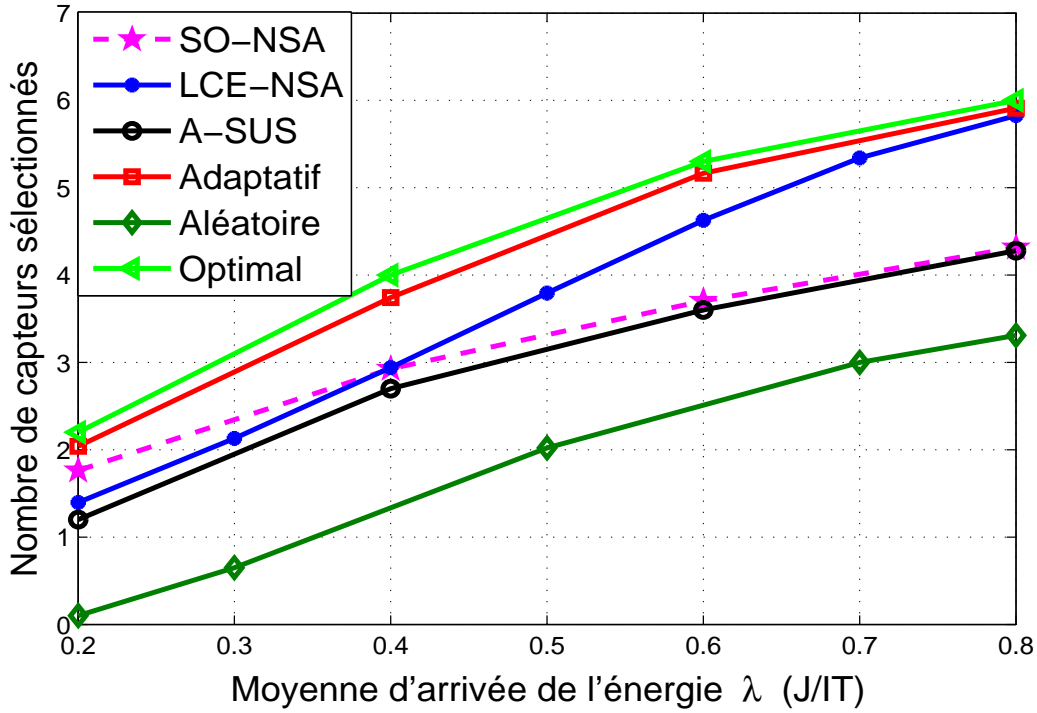


Figure 5.1 Comparaison des algorithmes pour différentes valeurs de λ ($\eta = 0dB$).

NSA)) et une technique de sélection adaptative (appelée Adaptive Node Selection Algorithm (A-NSA)) qui choisit à chaque intervalle de temps la technique qui offre le plus grand nombre de nœuds sélectionnés et en cas d'égalité, choisit au hasard une des deux techniques. En outre, une version adaptée de l'algorithme SUS (Semi-orthogonal User Selection) proposé dans (Yoo and Goldsmith, 2006) (notée A-SUS) dans lequel la présélection des nœuds est basée uniquement sur le gain du canal est également utilisé. Comme prévu, les deux algorithmes proposés surpassent R-NSA.

En outre, il y a une intersection entre la courbe de LCE-NSA et celle de SO-NSA près de $\lambda = 0,4$. À droite de l'intersection, LCE-NSA fonctionne mieux. Par conséquent, on en déduit que LCE-NSA est plus adapté à un environnement où les capteurs peuvent facilement récolter l'énergie et donc stocker une quantité d'énergie assez abondante dans leurs batteries. Par contre, SO-NSA possède une technique de sélection de nœud intelligente adaptée aux conditions de récolte d'énergie difficiles car elle minimise la quantité d'énergie requise pour transmettre. En comparaison avec A-SUS, on constate que SO-NSA réalise de meilleures performances, pour des valeurs faibles de λ , parce que sa présélection des nœuds est basée à la fois sur le gain de canal et l'état de la batterie. Lorsque λ se rapproche de 1, leurs performances deviennent presque les mêmes. Cela nous amène à conclure que l'état du canal est le décideur

quand nous avons une énergie abondante. Enfin, comme prévu, A-NSA surpasse les deux algorithmes proposés. Les performances de A-NSA sont proches de celles de l'algorithme optimal O-NSA. Ceci montre l'efficacité des algorithmes proposés.

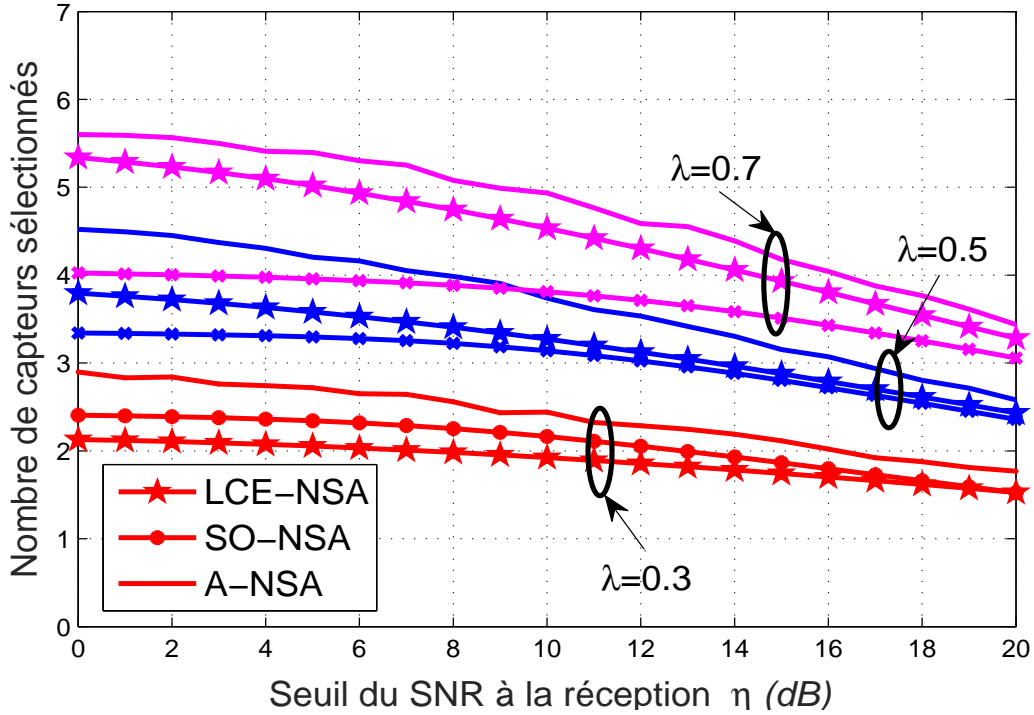


Figure 5.2 Comparaison des algorithmes pour différents η .

Le nombre de capteurs sélectionnés obtenus par les algorithmes proposés est comparé à la figure 5.2 pour différents seuils de SNR et différentes valeurs d'arrivée d'énergie différents. On constate que les courbes décroissent lorsque le seuil de SNR augmente. Lorsque η augmente, les nœuds ont des difficultés à accumuler suffisamment d'énergie pour satisfaire à la fois le SNR requis et les besoins énergétiques. Ceci provoque une réduction du nombre de capteurs sélectionnés. Cette réduction est de plus en plus importante lorsque λ est également faible. Tel qu'indiqué sur la figure 5.1, avec $\lambda = 0,7$ LCE-NSA surpasse SO-NSA mais avec $\lambda = 0,3$ nous avons le contraire. Nous observons que les deux algorithmes convergent vers les mêmes performances lorsque le SNR requis augmente. En effet, à $\eta = 16\text{dB}$, l'écart entre les courbes ne dépasse pas 2 %. Cela nous amène à la conclusion que SO-NSA est en mesure de surmonter les exigences de performance sévères. Cette différence observée dans les performances entre les algorithmes SO-NSA et LCE-NSA peut être expliquée par la technique de sélection intelligente basée sur la semi-orthogonalité des nœuds offerte par SO-NSA par rapport à celle fortement dépendante du profil de l'arrivée de l'énergie utilisée par LCE-NSA.

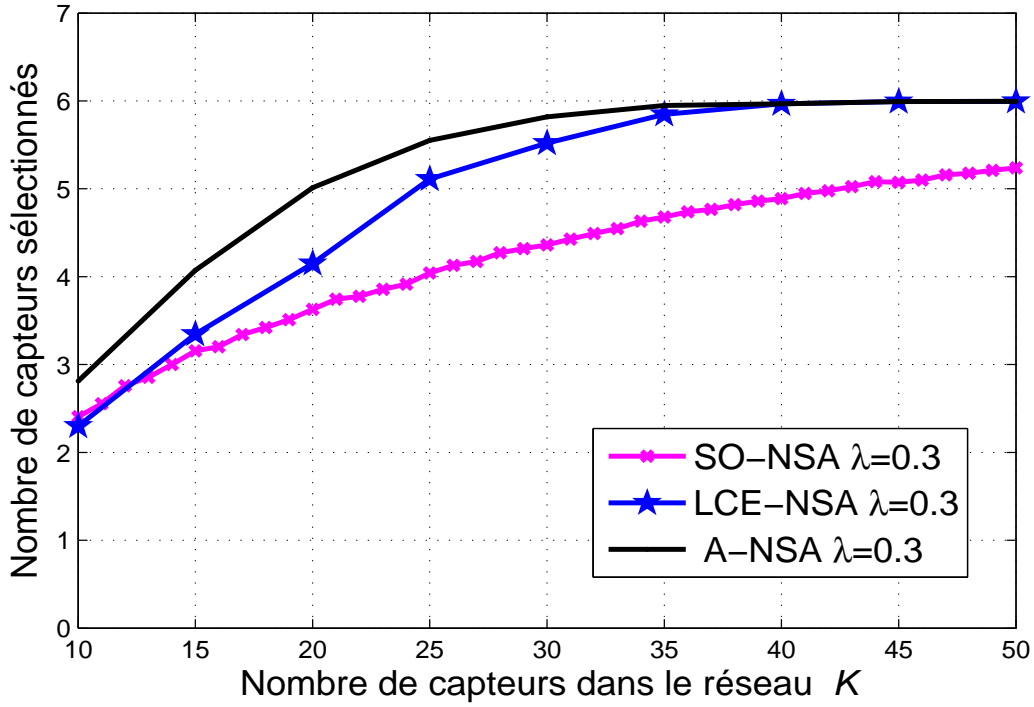


Figure 5.3 Comparaison des algorithmes pour différents K ($\eta = 0dB$).

La figure 5.3 démontre qu'un gain significatif peut être obtenu en augmentant le nombre de nœuds dans le réseau. En fait, ce gain est dû à deux sortes de diversités multi-utilisateurs :

- la diversité énergétique (Luo et al., 2014) : lorsque le nombre de nœuds est plus élevé, les nœuds ayant suffisamment d'énergie pour satisfaire les contraintes du système peuvent être trouvés avec une probabilité plus élevée ; et
- la diversité des canaux : lorsque le nombre de nœuds est plus élevé, le collecteur de données améliore sa capacité de choisir un ensemble de nœuds avec de bonnes séparations spatiales.

Comme prévu, l'algorithme adaptatif A-NSA a de meilleurs résultats.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents résultats des simulations des algorithmes proposés. Ces résultats montrent l'efficacité des techniques de sélection proposées par rapport à la solution optimale et leur pertinence dans le contexte de la récolte d'énergie.

CHAPITRE 6 AMÉLIORATIONS DE L'ÉQUITÉ ET RÉSULTATS

6.1 Introduction

L'équité est considérée comme un sujet de recherche multidisciplinaire et une considération très importante dans la majorité des études de performances. Il se pose dès qu'un partage de ressources peu importe sa nature est en jeu. Dans les réseaux, quand plusieurs périphériques se réunissent pour fournir un service ensemble, la question de l'équité s'impose (SHI et al., 2014). Dans ce chapitre, on présente les modifications apportées aux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA présentés dans le chapitre 3 afin d'améliorer leurs performances en terme d'équité.

6.2 Mesure d'équité utilisée

Mesurer l'équité peut prendre une forme qualitative ou/et quantitative. Du point de vue qualitatif, on trouve les métriques d'équité proportionnelle et l'équité max-min. Alors que du point de vue quantitatif, on trouve l'indicateur de Jain (Raj et al., 1998) ainsi que la mesure d'entropie (SHI et al., 2014). Vu que les mesures qualitatives ne sont pas capables de quantifier le degré d'équité du système, on va opter pour l'indicateur de Jain qui est la mesure de performance quantitative la plus utilisée. Cet indicateur proposé par (Raj et al., 1998) possède des propriétés très intéressantes qui sont :

- Indépendant de la taille de la population. C'est à dire l'indicateur est applicable à n'importe quel nombre d'utilisateurs que ce soit fini ou infini.
- Indépendant de l'échelle et la métrique. L'indépendance de l'échelle signifie que la mesure est indépendante de l'unité et la métrique utilisée. Dans ce sens, la variance peut être considérée comme un indicateur d'équité.
- Borné entre les valeurs 0 et 1.
- Continu dans le sens que chaque modification dans l'allocation doit apparaître au niveau de la mesure.

L'indicateur de Jain est défini par la formule suivante :

$$f(\mathbf{X}) = \frac{[\sum_{i=1}^n x_i]^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (6.1)$$

où x_i est la métrique dont on veut quantifier l'équité. Dans notre cas les x_i représentent le nombre de sélections du nœud i pour tout i .

6.3 Analyse d'équité

Cette section présente une analyse d'équité pour les algorithmes SO-NSA et LCE-NSA. Les figures 6.1 et 6.2 illustrent une analyse de l'équité pour les algorithmes proposés basés sur l'indice de Jain (Jain et al., 1984). Elle montre qu'à une valeur fixe du SNR seuil η , les stratégies est plus équitable quand λ prend des valeurs plus faibles. Ceci est dû au fait que, avec une faible valeur de λ , l'énergie récoltée obtenue est inférieure à l'énergie nécessaire pour la détection et la transmission. Dans ce cas, tous les nœuds ont la même difficulté à accumuler de l'énergie pour satisfaire les contraintes du SNR requis et de l'énergie. Par conséquent, ils ont quasiment la même probabilité de transmettre et pour cette raison, le système semble être équitable. On voit qu'à une valeur fixe du seuil de SNR η , l'indicateur d'équité diminue quand λ augmente. La raison est que lorsque l'énergie est souvent disponible à tous les nœuds, ceux qui sont plus proches du collecteur de données transmettent plus fréquemment. Cela se traduit par une détérioration de l'équité du système.

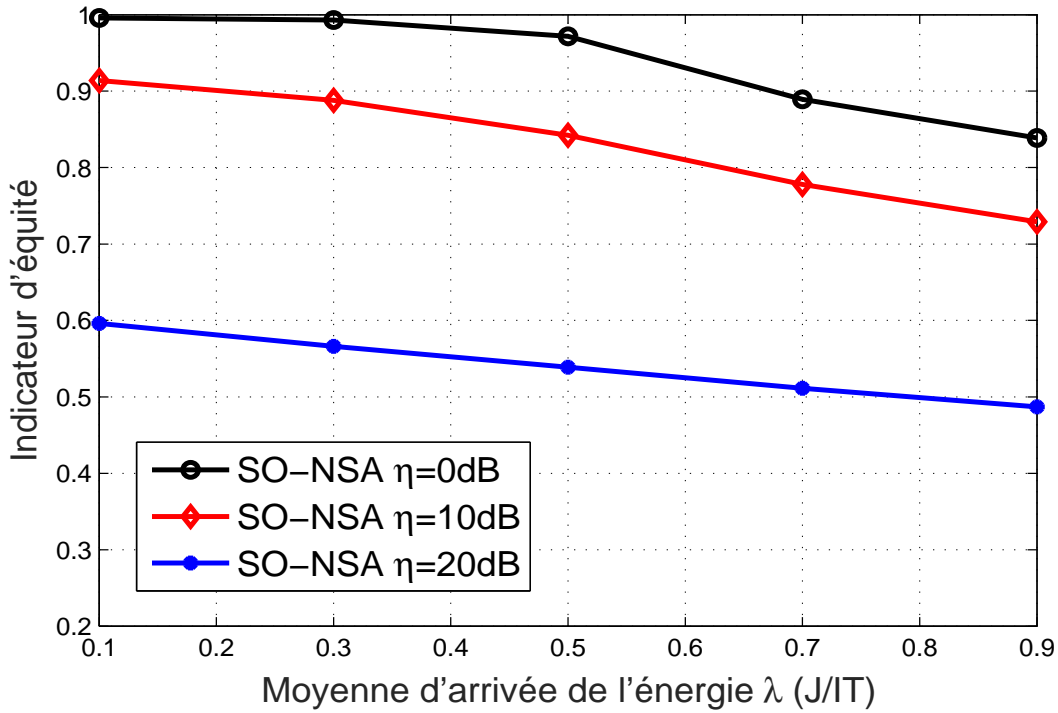


Figure 6.1 Analyse d'équité pour SO-NSA.

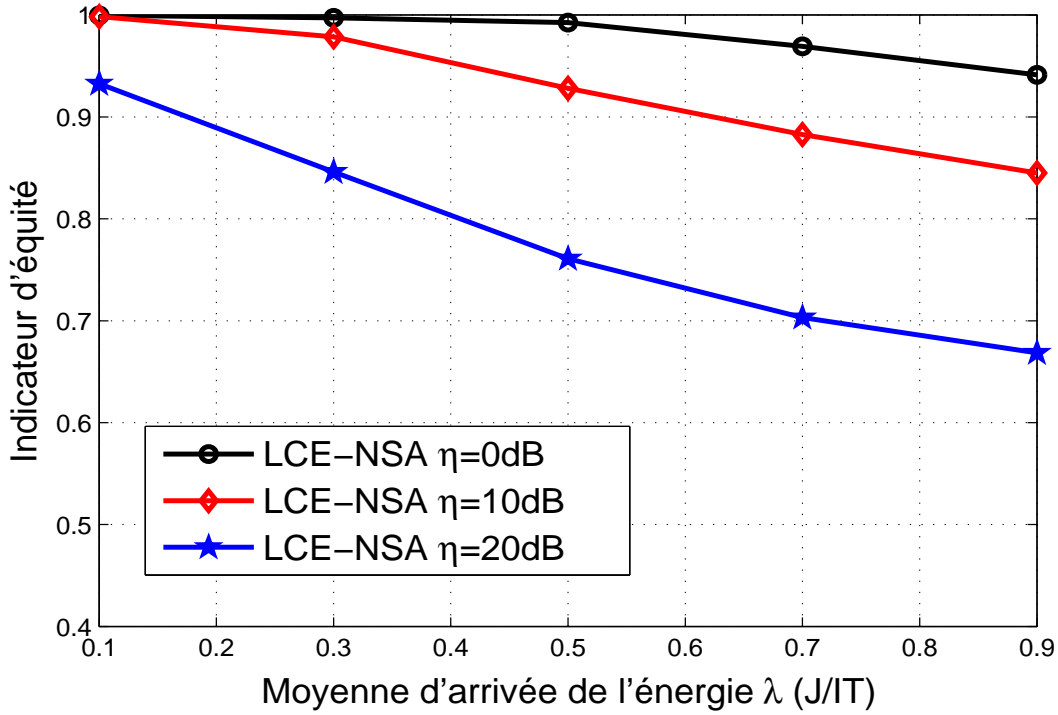


Figure 6.2 Analyse d'équité pour LCE-NSA.

En outre, la comparaison des deux figures 6.1 et 6.2 illustre que LCE-NSA est plus équitable que SO-NSA. Ceci est dû à la présélection des nœuds par SO-NSA dans laquelle le canal a un rôle important dans les décisions de sélection des nœuds. Voilà pourquoi cette différence dans l'équité augmente quand λ et η augmentent également. En effet, avec SO-NSA, le canal devient même le porteur de décision quand λ augmente alors que LCE-NSA tente de gérer l'énergie globale afin de donner la chance aux nœuds éloignés de transmettre.

6.4 Modifications apportées

Comme on l'a présenté dans la section précédente, les performances en termes d'équité des deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA varient selon la moyenne d'arrivée d'énergie ainsi que selon le seuil du SNR fixé par le système.

Dans le but d'améliorer la performance des algorithmes heuristiques précités, on propose d'ajouter deux métriques différentes à la présélection des nœuds. La première étant une technique fréquemment utilisée dans les réseaux traditionnels (c.-à-d., où on n'a pas de récolte d'énergie) et une deuxième qui tient compte des états des batteries des nœuds. Dans ce qui suit, une explication détaillée de ces modifications apportées.

6.4.1 Métrique en exponentielle

Dans cette partie, on présente la première modification qu'on a faite au niveau des algorithmes SO-NSA et LCE-NSA. Pour SO-NSA, ce changement consiste à modifier le critère de présélection comme suit :

$$E_k ||g_k|| e^{-N_k},$$

où N_k représente le nombre de fois que le capteur k a été sélectionné pendant la dernière fenêtre temporelle de taille F . La fenêtre F est une fenêtre temporelle glissante qui s'étale sur plusieurs intervalles de temps dont le nombre sera défini dans la partie 5.2.

La limitation du calcul du nombre de sélections pour chaque capteur à une fenêtre vient du fait que dans la pratique on se trouve dans l'impossibilité de calculer le nombre de fois où le capteur a été sélectionné jusqu'à l'infini. En plus, conserver des mesures sur une longue période demande des espaces de stockage importants dans la mémoire du collecteur des données, ce qui n'est pas une bonne idée vu l'importance des tâches dont il est responsable.

Dans le cas de LCE-NSA, la présélection des nœuds sera faite en se basant sur :

$$\{(E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k))e^{-N_k}\}.$$

On dénotera dans ce qui suit les deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA après l'ajout de la métrique en exponentielle précitée par FSO-NSA1 et FLCE-NSA1, respectivement.

En tenant compte de ce changement, le tri de l'ensemble \mathcal{L} pour FSO-NSA1 est réalisé comme suit :

$$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier}\{\{||\mathbf{g}_k|| E_k e^{-N_k}\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j\},$$

et pour FLCE-NSA1 :

$$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier}\{\{(E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k))e^{-N_k}\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j\}.$$

6.4.2 Métrique en moyenne statistique

Cette partie présente la deuxième modification proposée pour les algorithmes SO-NSA et LCE-NSA. Similairement à ce qu'on a fait dans la section 6.4.1, la métrique ajoutée modifie le critère de présélection des nœuds pour les deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA. En

effet, du côté du SO-NSA, ce changement consiste à modifier le critère de présélection selon l'expression suivante :

$$\frac{E_k ||\mathbf{g}_k||}{\mathbf{E}[||\mathbf{g}_k||] \mathbf{E}[E_k]},$$

où $\mathbf{E}[\mathbf{x}]$ désigne l'espérance de la variable aléatoire x calculée sur une fenêtre temporelle de F composée d'un nombre bien défini d'intervalles de temps. La définition du paramètre F est la même qu'on a utilisé dans la section 6.4.2. La motivation derrière cette modification consiste à introduire des statistiques sur l'historique des processus de l'arrivée de l'énergie et des canaux (c.-à-d., la moyenne des processus) sur une fenêtre F afin d'améliorer l'équité entre les nœuds du réseau.

Dans le cas de LCE-NSA, la présélection des nœuds sera faite en se basant sur le critère donné par la relation suivante :

$$\frac{E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k)}{\mathbf{E}[||\mathbf{h}_k||] \mathbf{E}[E_k]}.$$

On désignera dans ce qui suit les deux algorithmes SO-NSA et LCE-NSA après l'ajout de la métrique en moyenne statistique par FSO-NSA2 et FLCE-NSA2, respectivement.

En tenant compte de ce changement, le tri de l'ensemble \mathcal{L} pour FSO-NSA2 est réalisé comme suit :

$$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier} \left\{ \left\{ \frac{||\mathbf{g}_k|| E_k}{\mathbf{E}[||\mathbf{g}_k||] \mathbf{E}[E_k]} \right\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j \right\},$$

et pour FLCE-NSA2 :

$$\mathcal{L} \leftarrow \text{trier} \left\{ \left\{ \frac{(E_k - (e_k(\mathcal{C}_0) + s_k))}{\mathbf{E}[||\mathbf{h}_k||] \mathbf{E}[E_k]} \right\}_{k \in \mathcal{S}_j}, \mathcal{S}_j \right\}$$

6.5 Résultats numériques

Les résultats présentés ci-dessous s'ajoutent à ceux présentés dans le chapitre précédent. On présentera les valeurs des paramètres utilisés ainsi que les résultats des performances des algorithmes 3 et 4 proposés dans le chapitre 4.

6.5.1 Choix des paramètres

Les paramètres utilisés dans cette partie sont les mêmes que ceux utilisés dans le chapitre 5. La taille de la fenêtre temporelle sera égal a $F = 100$ intervalles de temps dans cette partie.

6.5.2 Résultats des simulations

Dans cette section, on discute les résultats numériques après les modifications apportées sur les algorithmes 3 et 4. La figure 6.3 compare les indicateurs de Jain des algorithmes SO-

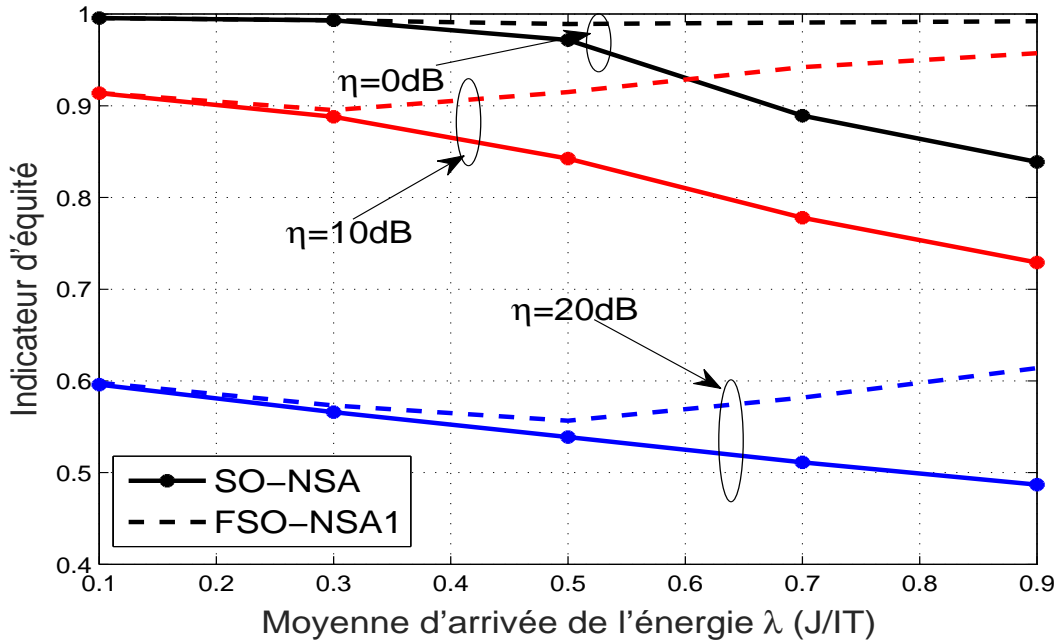


Figure 6.3 Comparaison de l'indicateur de Jain pour SO-NSA et FSO-NSA1.

NSA et FSO-NSA1. On remarque que la valeur de l'indicateur de Jain est presque la même entre $\lambda = 0.1$ et $\lambda = 0.5$. Puis, on commence à observer une amélioration remarquable par rapport à l'ancienne valeur de l'indicateur réalisé avec SO-NSA. En effet, ceci s'explique par le fait qu'avec des faibles valeurs de λ , ajouter e^{-N_k} n'améliore pas l'équité car déjà tous les nœuds éprouvent un manque d'énergie et donc dès qu'un nœud récolte l'énergie, il va être sélectionné vu que N_k reste faible et presque le même pendant la fenêtre F chez tous les nœuds. Maintenant, lorsque λ augmente, c'est à dire le nœud peut accumuler plus facilement l'énergie. Cette situation va créer des disparités entre les nœuds car le gain de canal va dominer la présélection dans ce cas. Donc, le fait d'ajouter e^{-N_k} va faire une sorte de pénalité pour ceux qui sont fréquemment sélectionnés et donc augmenter les chances des autres capteurs

pur être sélectionnés d'où l'augmentation de la valeur de l'indicateur de Jain pour des valeurs de λ assez élevées. Plus λ augmente, plus cette augmentation devient importante. La figure.

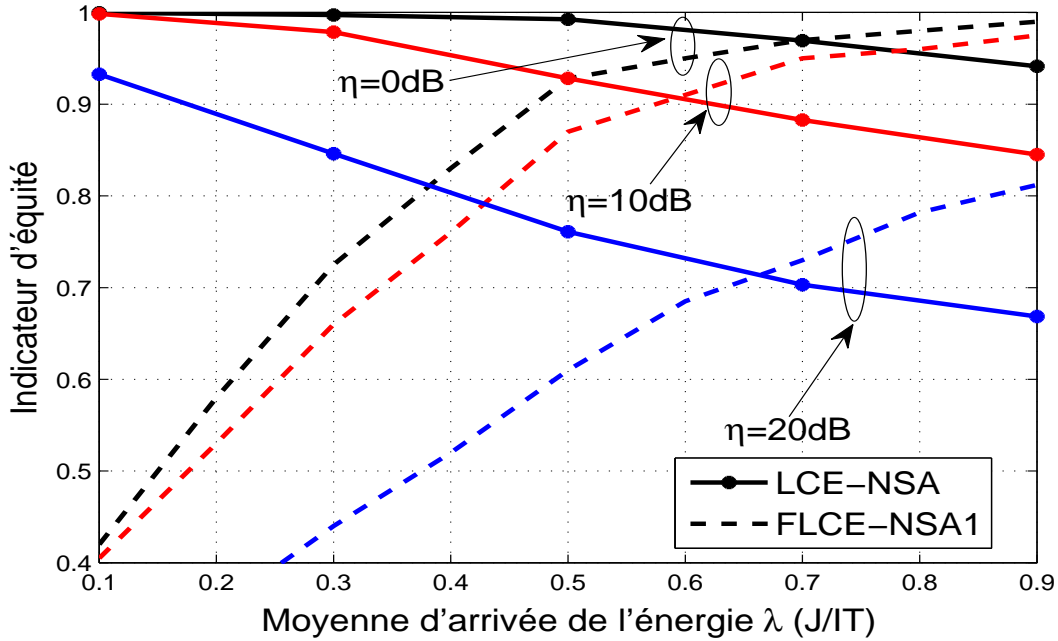


Figure 6.4 Comparaison de l'indicateur de Jain pour LCE-NSA et FLCE-NSA1.

6.4 montre l'impact de l'ajout de la métrique d'équité en exponentielle sur LCE-NSA. On remarque que lorsque λ est faible, l'indice d'équité de FLCE-NSA1 est plus mauvais que celui réalisé avec LCE-NSA (entre $\lambda = 0.1$ et $\lambda = 0.7$). En fait, lorsque λ est faible, les quantités d'énergie disponibles dans les batteries E_k sont faibles, ce qui rend les quantités d'énergie restantes $E_k - (e_k + s_k)$ encore plus faibles. Donc, dans le nouveau critère de présélection de FLCE-NSA1, le numérateur (c.-à-d., l'énergie restante) et le dénominateur (c.-à-d., e^{-N_k}) n'ont pas le même ordre de grandeur. Dans ce cas, FLCE-NSA1 devient très pénalisant au point d'écarter certains capteurs par la diminution de leur ordre dans la présélection. Donc, plus λ augmente, plus la situation se rétablit et l'équité s'améliore. La figure 6.5, montre l'impact de la division par les moyennes des gains du canal et de l'état des batteries sur la valeur de l'indicateur de Jain. On remarque que l'équité s'est améliorée pour les différentes valeurs de η et λ .

Avec FSO-NSA2, le fait de diviser pour chaque capteur l'ancien critère de présélection de SO-NSA, par la moyenne de l'énergie disponible et le gain de son canal permet d'équilibrer les états des batteries. Cette uniformisation de la disponibilité de l'énergie chez tous les capteurs présents dans le réseau, est à l'origine de l'augmentation de l'équité entre les nœuds car

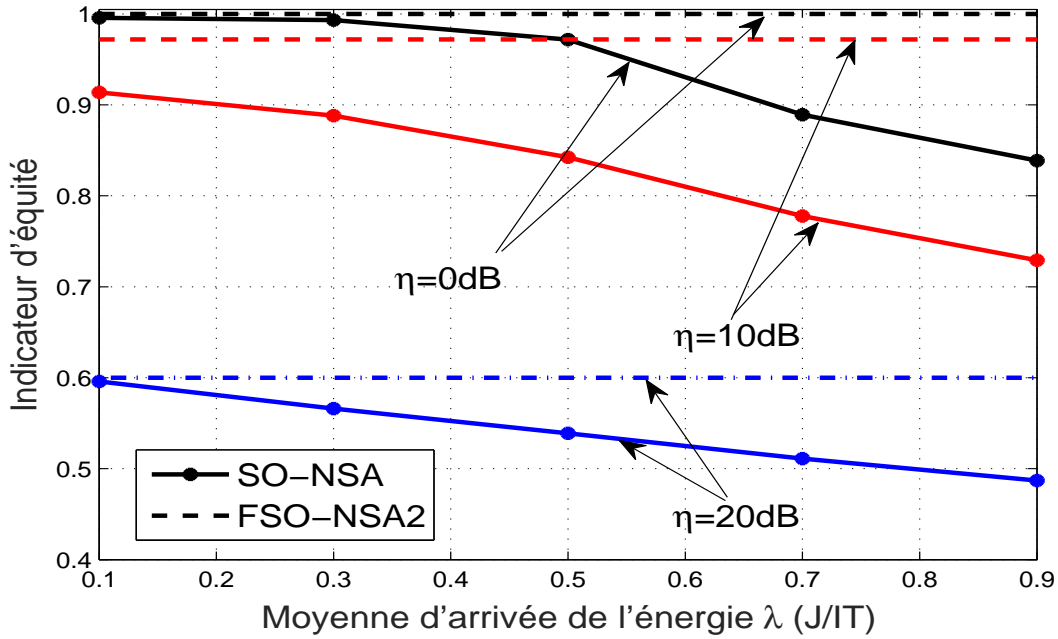


Figure 6.5 Comparaison de l'indicateur de Jain pour SO-NSA et FSO-NSA2.

cette action permet d'atténuer les disparités énergétiques et spatiales instantanées par les moyennes calculées sur un historique qui s'étale sur une fenêtre temporelle F composée de 100 intervalles de temps.

Cette sorte d'équilibrage réalisée par la métrique de présélection de FSO-NSA2 a une action stable sur l'équilibrage des batteries au fil du temps car le numérateur et le dénominateur de la métrique de présélection de FSO-NSA2 ont toujours le même ordre de grandeur. Ceci rend la valeur de l'indicateur d'équité constant et ne dépend pas de λ . On remarque aussi que plus η augmente, plus la valeur de l'indicateur de Jain diminue. En réalité, lorsque le seuil de SNR requis η augmente, la probabilité qu'un nœud sera sélectionnable diminue chez tout les nœuds. Par conséquent, on peut déduire que c'est l'énergie disponible qui domine la décision de sélection dans ce cas. Dans la figure 6.6, on compare les valeurs de l'indicateur d'équité de LCE-NSA et FLCE-NSA2. On voit clairement que la valeur de l'indicateur de Jain s'est améliorée avec FCE-NSA2. En plus, elle est fixe et la même pour les différentes valeurs du SNR requis η . L'explication est similaire à celle de la figure. 6.5.

La figure 6.7 illustre les performances de SO-NSA et FSO-NSA1 en fonction du seuil du SNR requis à la réception η . Comme celles de SO-NSA, les courbes de FSO-NSA1 sont aussi décroissantes en fonction de η . Pour $\lambda = 0.3$ et $\lambda = 0.5$, on remarque que FSO-NSA1 réalise de meilleures performances. Ceci est dû au fait que l'ajout de l'équité entre les différents nœuds

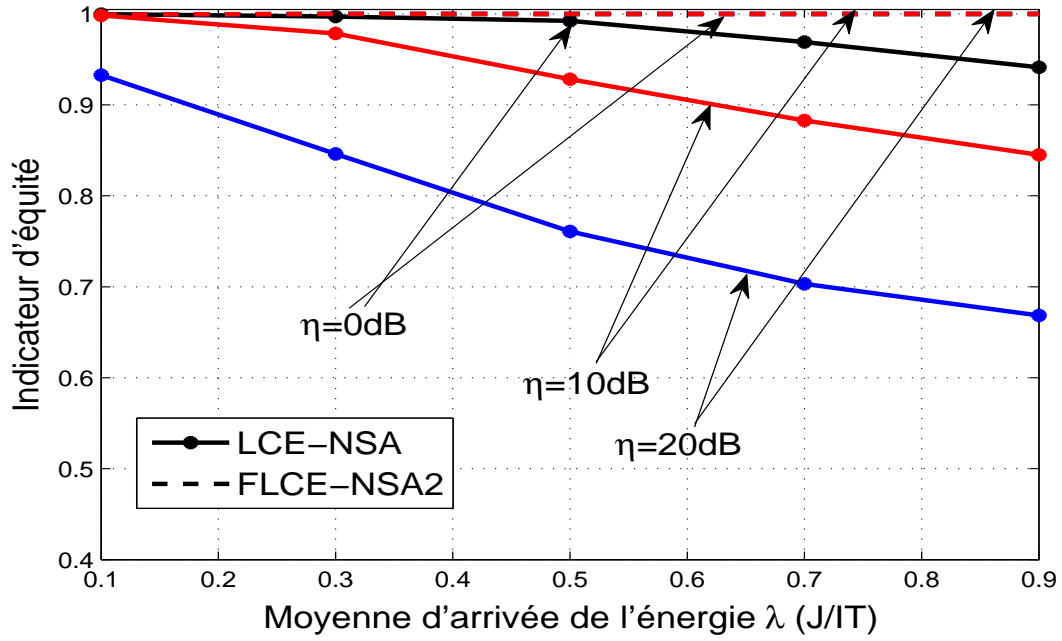


Figure 6.6 Comparaison de l'indicateur de Jain pour LCE-NSA et FLCE-NSA2.

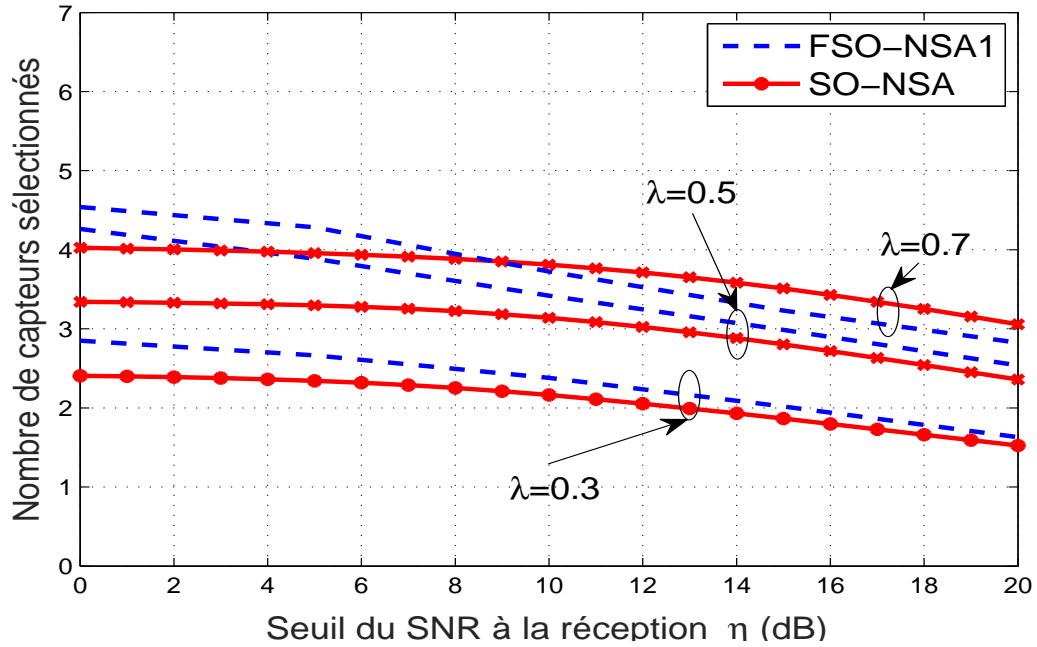


Figure 6.7 Comparaison des performances de SO-NSA et FSO-NSA1.

assure un certain lissage des batteries des capteurs. Par conséquent, les quantités d'énergie disponibles dans leurs batteries deviennent semblables et donc l'ensemble de capteurs éligibles

pour la sélection s'élargit. Ceci favorise à son tour l'augmentation du nombre de nœuds sélectionnés d'où l'augmentation des performances de FSO-NSA1 constatées.

Avec la valeur $\lambda = 0.7$, on remarque qu'entre les seuils de SNR $\eta = 0dB$ et $\eta = 9dB$, FSO-NSA1 possède de meilleures performances comme le cas de $\lambda = 0.3$ et $\lambda = 0.5$ précédemment expliqué. Mais, après, entre $\eta = 9dB$ et $\eta = 20dB$, on observe l'inverse. Ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque η augmente, le lissage comme on l'a dit laisse les états des batteries très semblables. En conséquence, plus le seuil de SNR augmente, on trouve que le nombre de nœuds éligibles pour la sélection diminue car on ne peut plus trouver des nœuds qui restent longtemps sans être sélectionné et donc accumulent suffisamment d'énergie pour qu'il soit sélectionné lorsque la QoS devient plus sévère. Ce résultat est naturel car le but de l'équité qu'on a instauré stipule que tout les nœuds participe à la transmission à parts égales. C'est pourquoi les performances de FSO-NSA1 deviennent inférieures à celles de SO-NSA lorsque le SNR augmente.

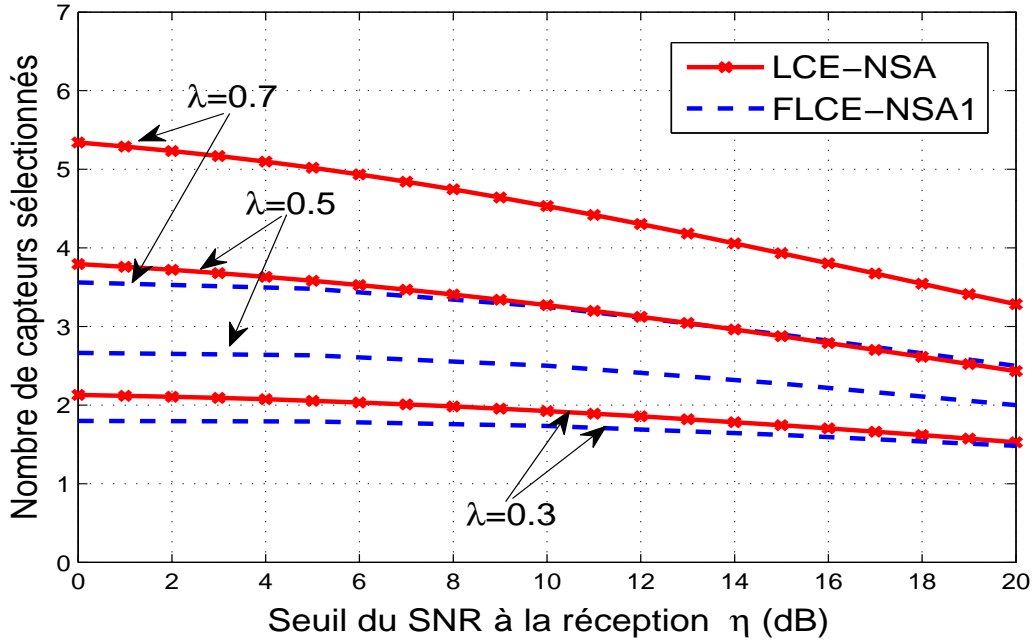


Figure 6.8 Comparaison des performances de LCE-NSA et FLCE-NSA1.

La figure 6.8 montre les performances de LCE-NSA et FLCE-NSA1 en terme de nombre de nœuds sélectionnés. Comme prévu, on remarque qu'en ajoutant l'équité les performances se dégradent. La dégradation des performances est plus importante lorsque λ diminue. En fait, lorsque λ diminue, les capteurs sont en manque d'énergie ce qui rend l'ensemble des capteurs éligibles pour être choisis trop restreint. Dans ce cas, imposer en plus une mesure d'équité

ne va pas engendrer une diminution du nombre de nœuds sélectionnés car il est déjà faible à l'origine.

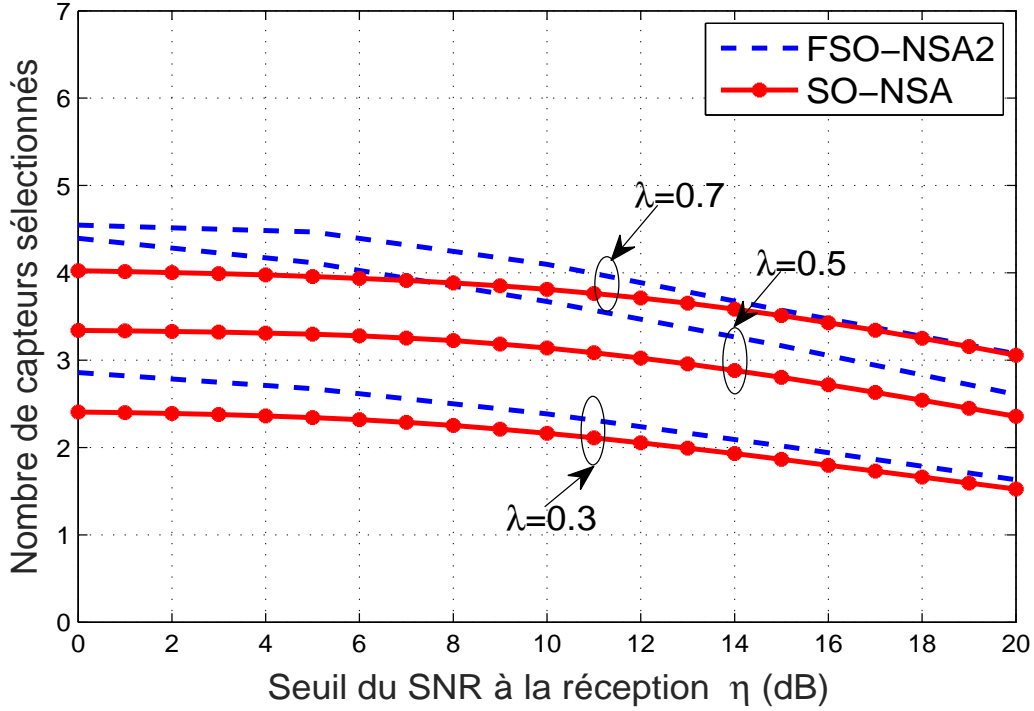


Figure 6.9 Comparaison des performances de SO-NSA et FSO-NSA2.

figure 6.9 présente une comparaison entre les performances des algorithmes SO-NSA et FSO-NSA2 en termes du nombre de nœuds sélectionnés. On remarque que FSO-NSA2 est plus performant que FSO-NSA1 dans la figure 6.7. La différence ici c'est que le lissage de FSO-NSA2 est plus efficace puisque le numérateur et le dénominateur de la métrique de la présélection de FSO-NSA2 ont le même ordre de grandeur. Par conséquent, les courbes de SO-NSA et FSO-NSA2 dans figure 6.9 s'approchent plus lentement avec $\lambda = 0.7$ par rapport au cas de SO-NSA et FSO-NSA1 illustré dans figure 6.8.

L'amélioration des performances de SO-NSA en ajoutant des métriques d'équité, ne veut pas dire que l'algorithme SO-NSA présenté dans le chapitre 4 n'est pas efficace mais ceci est dû au fait qu'en introduisant des statistiques sur le comportement de la batterie et du canal de chaque capteur, on ajoute des informations sur le temps. Ces nouvelles informations permettent d'améliorer l'efficacité de la gestion de sélection réalisée par le collecteur des données au sein du réseau d'où l'amélioration des performances. figure 6.10 illustre la comparaison du nombre de capteurs sélectionnés de LCE-NSA et FLCE-NSA2. Comme on l'a prévu, les performances se dégradent en ajoutant l'équité à LCE-NSA. L'explication est similaire à

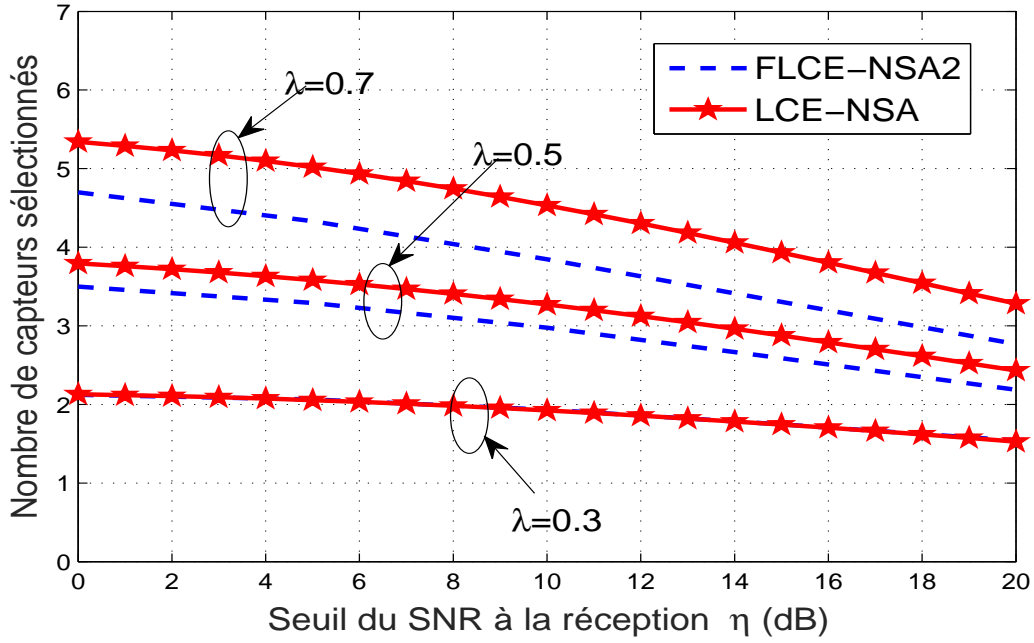


Figure 6.10 Comparaison des performances de LCE-NSA et FLCE-NSA2.

celle de la figure 6.8. La différence ici c'est qu'avec $\lambda = 0.3$, on a les mêmes performances pour LCE-NSA et FLCE-NSA2. Ceci est dû au fait que dans les conditions sévères d'énergie, l'ajout de l'équité ne change rien vu que l'ensemble des nœuds faisable est de taille limitée.

6.6 Conclusion

Ce chapitre présentant les résultats numériques des améliorations apportées sur les deux algorithmes proposés dans ce travail en termes d'équité, mène ce mémoire à sa fin. Les résultats numériques montrent que les techniques d'équité traditionnelles ne sont pas très efficaces dans le contexte d'un réseau de capteur avec récolte d'énergie tandis qu'utiliser des métriques énergétiques sont efficaces.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

En guise de conclusion, on présente dans ce qui suit une brève synthèse des travaux effectués dans cette maîtrise ainsi que les limitations des solutions proposées et les améliorations futures envisagées.

7.1 Synthèse des travaux

Dans ce travail, on a étudié le problème issu d'un réseau de capteurs sans fil dans lequel les nœuds émetteurs sont capables de récolter l'énergie à partir des sources d'énergie renouvelables alors que le récepteur est équipé de plusieurs antennes et utilise un récepteur linéaire « zero-forcing ». Ce mémoire commence par une présentation des réseaux de capteurs sans fil, les systèmes à antennes multiples ainsi que le concept de la récolte d'énergie. On a mis l'accent sur les bienfaits de la technologie de la récolte d'énergie qui malgré le grand nombre des capteurs déployés, peut réduire les coûts prohibitifs associés au remplacement de leurs batteries traditionnellement utilisées et nécessitant des interventions manuelles pour leur recharge ou/et remplacement. Par conséquent, cette technologie est prometteuse dans ce domaine d'application améliorant ainsi la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil et réduisant les dépenses liées à leur entretien et leur maintenance. Une brève revue de littérature est présentée à la suite de cet aperçu général sur les différents concepts introduits.

Premièrement, on a étudié le problème de sélection des nœuds qui est un problème très important dans les réseaux sans fil en général et les réseaux de capteurs sans fil en particulier. Le problème abordé est modélisé sous la forme d'un programme non linéaire en nombres entiers soumis à des contraintes de qualité de service en terme de rapport signal sur bruit requis à la réception. Cette étude est importante vu que l'intégration de la récolte d'énergie dans les réseaux de capteurs change beaucoup de choses et rend les techniques de sélection déjà élaborées obsolètes dans ce contexte. On a montré que le problème traité dans ce travail est un problème **NP**-difficile.

Ensuite, on a présenté deux algorithmes heuristiques afin de résoudre ce problème. Les deux algorithmes sont centralisés, fonctionnent sur le lien montant et nécessitent une connaissance des états des batteries ainsi que des canaux entre les capteurs émetteurs et le collecteur de données. Des analyses de la complexité ont révélé que les algorithmes développés possèdent des complexités de calcul polynomiales beaucoup plus réduites que la complexité exponentielle de l'algorithme optimal basé sur la recherche exhaustive. En outre, ces algorithmes

proposés donnent de bonnes performances par rapport à la solution optimale. Une évaluation de l'équité des deux algorithmes développés a été également présentée. L'efficacité des deux algorithmes a été évaluée via des simulations comparant les techniques proposées avec une technique de sélection aléatoire ainsi que à la solution optimale réalisée par la recherche exhaustive. Une comparaison a été également faite entre les algorithmes proposés et un algorithme qui ne tient pas en compte l'état de batterie d'énergie dans sa politique de sélection. Cette comparaison révèle la limitation de cette technique traditionnelle de sélection basée uniquement sur l'état du canal et montre que la dimension de l'énergie joue un rôle crucial dans la prise des décisions pour la sélection des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil et récolteurs d'énergie.

Finalement, deux modifications ont été aussi apportées sur les deux algorithmes heuristiques développés afin d'améliorer l'équité des stratégies proposées. Les améliorations ont été quantifiées à l'aide de l'indicateur de Jain. Les performances de ces changements ont été évaluées via des simulations. Les résultats numériques montrent que les techniques d'équité traditionnelles ne sont pas très efficaces dans le contexte d'un réseau de capteur avec récolte d'énergie.

7.2 Limitations de la solution proposée

Les principales limitations du travail réalisé se situent au niveau de l'utilisation d'un récepteur linéaire qui limite le nombre de capteurs sélectionnés au nombre des antennes présentes chez le récepteur. Ce même récepteur a rendu la formulation du problème non linéaire à cause de l'expression compliquée et difficile à linéariser. Aussi, une autre limitation de ce travail peut être due au fait que les techniques de sélection proposées ne considèrent pas des prévisions futures quant à l'arrivée de l'énergie et suppose une capacité de stockage infinie chez les capteurs. En outre, l'hypothèse qui suppose la connaissance parfaite des canaux et des états des batteries des capteurs par le collecteur des données peut engendrer des trafics supplémentaires causant la diminution du débit de données circulant sur la voie montante.

7.3 Améliorations futures

Dans le futur, on envisage d'améliorer les algorithmes développés en introduisant la sélection en ligne qui tient compte des arrivées de l'énergie dans le futur afin de rendre la sélection plus efficace et ne pas se contenter par des techniques conservatrices de l'énergie. En outre, une amélioration qui peut être envisagée est de traiter le cas d'une sélection des nœuds ayant des batteries limitées en capacité. Aussi, on pourra changer le récepteur linéaire utilisé dans ce travail et aller voir d'autres récepteurs qui facilitent la résolution analytique de ce genre de

problème. Une autre piste qui pourra être intéressante est de proposer des algorithmes distribués afin d'omettre l'hypothèse de la connaissance parfaite du canal et l'énergie disponible de chaque capteur présent dans le réseau.

RÉFÉRENCES

- W. Ajib et D. Haccoun, “An overview of scheduling algorithms in MIMO-based fourth-generation wireless systems”, *IEEE Netw.*, vol. 19, no. 5, pp. 43–48, Sept 2005.
- I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, “A survey on sensor networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, Aug 2002.
- S. Basagni, Y. Nderi, C. Petrioli, et D. Spenza, *wireless sensor networks with energy harvesting*. John Wiley and Sons Inc, Hoboken, 2012.
- J. Bickerstaffe, “Energy Harvesting”, 2011, consulté le : 2016-04-15.
- S. Chalasani et J. M. Conrad, “A survey of energy harvesting sources for embedded systems”, dans *Proc. IEEE SoutheastCon*, Huntsville, April 2008, pp. 442–447.
- F. Charles, L. Van, et G. H. Golub, éd., *Matrix Computations*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1983.
- J. Chen, T. Wei, et J. Liang, “State-aware dynamic frequency selection scheme for energy-harvesting real-time systems”, *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 22, no. 8, pp. 1679–1692, Aug 2014.
- Cisco, “Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update”, 2011, consulté le : 2014-07-15.
- M. Erdelj, N. Mitton, et E. Natalizio, “Applications of industrial wireless sensor networks”, dans *Industrial Wireless Sensor Networks*, G. P. . Hancke, éd. CRC Press, 2013, pp. 173–177.
- M. R. Garey et D. S. Johnson, éd., *Computers and intractability : a guide to the theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman and Company, United States, 1979.
- M. Goonewardena, A. Yadav, W. Ajib, et H. Elbiaze, “Fair scheduling for energy harvesting nodes”, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 3, pp. 229–232, June 2015.
- P. B. Györke, P., “Application of energy-harvesting in wireless sensor networks using predictive scheduling”, dans *Proc. IEEE I2MTC*, Graz, May 2012, pp. 582–587.

- M. Haenggi, *Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks*. CRC PRESS, Boca Raton London New York Washington, D.C, 2005.
- A. Hentati, F. Abdelkefi, et W. Ajib, “Energy allocation for sensing and transmission in WSNs with energy harvesting Tx/Rx”, dans *Proc. IEEE VTC*, Boston, Sept 2015, pp. 1–5.
- A. Hentati, E. Driouch, J. F. Frigon, et W. Ajib, “Low complexity node selection algorithms in MU-MIMO energy harvesting WSNs”, dans *Proc. IEEE VTC*, Montreal, Sept 2016.
- G. E. Hovland et B. J. McCarragher, “Dynamic sensor selection for robotic systems”, dans *Proc. IEEE ICRA*, vol. 1, Albuquerque, Apr 1997, pp. 272–277 vol.1.
- V. Isler et R. Bajcsy, “The sensor selection problem for bounded uncertainty sensing models”, dans *Proc. IEEE IPSN*, Los Angeles, April 2005, pp. 151–158.
- A. Çivril et M. Magdon-Ismail, “On selecting a maximum volume sub-matrix of a matrix and related problems”, *Theoretical Computer Science*, vol. 410, no. 47–49, pp. 4801 – 4811, 2009.
- R. Jain, D. Chiu, et W. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems”, *DEC Research Report*, vol. TR-301, Sept 1984.
- S. Joshi et S. Boyd, “Sensor selection via convex optimization”, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 2, pp. 451–462, Feb 2009.
- J. Kabara, “Lecture notes number 5 in telecommunications : Wireless data networks”, June 2005.
- M. Kashef et A. Ephremides, “Optimal packet scheduling for energy harvesting sources on time varying wireless channels”, *Journal of Communications and Networks*, vol. 14, no. 2, pp. 121–129, April 2012.
- T. J. Kazmierski et S. Beeby, *Energy Harvesting Systems : Principles, Modeling and Applications*. Springer New York, 2010.
- T. Koga, K. Toyoda, et I. Sasase, “Adaptive relay selection with energy and channel information in energy harvesting WSNs”, dans *Proc. IEEE CCNC*, Las Vegas, Jan 2015, pp. 696–701.

I. K. Kookos et J. D. Perkins, “A systematic method for optimum sensor selection in inferential control systems”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 38, no. 11, pp. 4299–4308, 1999.

K. N. Lau, “Analytical framework for multiuser uplink MIMO space-time scheduling design with convex utility functions”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 1832–1843, Sept 2004.

Y. H. Lee et K. H. Liu, “Battery-aware relay selection for energy-harvesting relays with energy storage”, dans *Proc. IEEE PIMRC*, Hong Kong, Aug 2015, pp. 1786–1791.

L. Liang, U. Mukherji, et V. Joseph, “Low complexity user scheduling algorithms for uplink multiuser MIMO systems”, dans *Proc. IEEE CHINACOM*, Harbin, Sept 2011, pp. 186–190.

B. C. Lim, W. A. Krzymien, et C. Schlegel, “Transmit antenna selection for sum rate maximization in transmit zero-forcing beamforming”, dans *Proc. IEEE ICCS*, Singapore, Oct 2006, pp. 1–5.

Y. Luo, J. Zhang, et K. B. Letaief, “Optimal scheduling and power allocation for two-hop energy harvesting communication systems”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4729–4741, September 2013.

Y. Luo, J. Zhang, et K. Letaief, “Achieving energy diversity with multiple energy harvesting relays”, dans *Proc. IEEE WCSP*, Hefei, Oct 2014, pp. 1–6.

J. Marasevic, C. Stein, et G. Zussman, “Max-min fair rate allocation and routing in energy harvesting networks : Algorithmic analysis”, *CoRR*, vol. abs/1406.3671, 2014.

M. N. B. Medepally, B., “Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3543–3553, Nov 2010.

Q. Meng, W. Zong, S. Shao, W. Zhu, et B. Zheng, “A near fair user scheduling scheme in cognitive radio networks”, dans *Proc. IEEE WiCOM*, Beijing, Sept 2009, pp. 1–4.

News Reporter-Staff, “Research and markets; Energy harvesting in Action 2012”, NewsRx, Atlanta, United States, Rapp. tech., 2012.

NICS labs, “Critical infrastructures protection”, 2014, consulté le : 2016-04-28. En ligne : <https://www.nics.uma.es/research/critical-infrastructures-protection>

S. Park, J. Heo, B. Kim, W. Chung, H. Wang, et D. Hong, “Optimal mode selection for cognitive radio sensor networks with RF energy harvesting”, dans *Proc. IEEE PIMRC*, Sydney, Sept 2012, pp. 2155–2159.

A. Paulraj, R. Nabar, et D. Gore, éd., *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2003.

A. F. Pele, “10 energy harvesting solutions for 2012”, 2012. En ligne : <http://www.embedded.com/print/4403423>

K. T. Phan et T. Le-Ngoc, “Online QoS-based dynamic scheduling in multi-channel wireless networks”, dans *Proc. IEEE WCNC*, Shanghai, April 2013, pp. 586–590.

S. A. Putra, “System multiagent pada wireless sensor network”, 2014. En ligne : <https://senoap.wordpress.com/2014/01/17/sistem-multiagent-pada-wireless-sensor-network/>

R. A. Raghuvir, D. Rajan, et M. D. Srinath, “Capacity and fairness of the multiple access channel in energy harvesting wireless networks”, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 21–31, 2013.

J. Raj, C. Dah-Ming, et W. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems”, *CoRR*, vol. cs.NI/9809099, 1998. En ligne : <http://arxiv.org/abs/cs.NI/9809099>

S. Roundy, D. Steingart, L. Wright, et J. Rabaey, *Power sources for wireless sensor networks*. Proc. IEEE EWSN, 2004.

P.-I. A. Rubio, J., “Energy-efficient resource allocation techniques for battery management with energy harvesting nodes : A theoretical approach”, dans *Proc. IEEE WCNC*, Shanghai, April 2013, pp. 795–800.

V. Sharma, U. Mukherji, et V. Joseph, “Efficient energy management policies for networks with energy harvesting sensor nodes”, dans *Proc. IEEE Allerton*, Urbana-Champaign, Sept 2008, pp. 375–383.

V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, et S. Gupta, “Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 1326–1336, April 2010.

- H. SHI, R. V. Prasad, E. Onur, et I. G. M. M. Niemegeers, “Fairness in wireless networks :issues, measures and challenges”, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–24, 2014.
- S. Sigdel et W. Krzymien, “Fair Scheduling and Antenna Selection Algorithms for Multiuser MIMO Orthogonal Space Division Multiplexing Downlink”, dans *Proc. IEEE IST*, Budapest, July 2007, pp. 1–7.
- E. Telatar, “Capacity of multi-antenna gaussian channels”, *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585–598, Nov 1999.
- G. Tuna, V. C. Gungor, et K. Gulez, “Energy harvesting techniques for industrial wireless sensor networks”, dans *Industrial Wireless Sensor Networks*, G. P. . Hancke, éd. CRC Press, 2013, pp. 119–136.
- H. Venkataraman et G. M. Muntean, *Green Mobile Devices and Networks : Energy Optimization and Scavenging Techniques*. CRC Press, 2012.
- F. Wang, T. Zhang, et R. Feng, “Limited feedback scheme in the presence of feedback delay using kalman filter”, dans *Proc. IEEE ICCTA*, Beijing, oct 2011.
- Q. Wang et T. Zhang, “A survey on security in wireless sensor networks”, dans *Security in RFID and Sensor Networks*, CRC Press, Group, 2009, pp. 393 – 148.
- , “Wireless sensor networks - an introduction”, dans *Wireless Sensor Networks : Application-Centric Design*, Y. K. Tan, éd. InTech, 2010.
- J. Whitacre, M. Rumney, et D. Ah, “Analyze Antenna Approaches for LTE Wireless Systems”, Aug 2008, consulté le : 2016-04-15. En ligne : <http://mwrf.com/test-and-measurement/analyze-antenna-approaches-lte-wireless-systems>
- T. Wu et H. C. Yang, “RF energy harvesting with cooperative beam selection for wireless sensors”, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 585–588, Dec 2014.
- W. Xue, W. Sheng, et B. Daowei, “Dynamic sensor nodes selection strategy for wireless sensor networks”, dans *Proc. IEEE ISCIT*, Sydney, Oct 2007, pp. 1137–1142.
- J. Yang, “Optimal sensing scheduling in energy harvesting sensor networks”, dans *Proc. IEEE ICC*, Sydney, June 2014, pp. 4077–4082.

J. Yang et S. Ulukus, “Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 60, no. 1, pp. 220–230, January 2012.

J. Yang, X. Wu, et J. Wu, “Optimal scheduling of collaborative sensing in energy harvesting sensor networks”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 3, pp. 512–523, 2015.

T. Yoo et A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528–541, March 2006.

G. Zielke, “Matrix computation. second edition”, *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 74, no. 3, pp. 166–166, 1994.